

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Možnosti použití LED diod při osvětlování komunikací
Possibility of using LEDs to illuminate the road

2011

Jan Zálešák

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Měření a návrhové varianty jsem vypracoval samostatně bez zamlčení nekorektních údajů.

V Ostravě dne 6. 5. 2011

.....
Jan Zálešák

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc. a panu Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D. za jejich neutuchající ochotu věnovat svůj čas a zájem. Zvláštní poděkování pak zaslouží nesmírný dar motivace a povzbuzení, který je takto předáván.

Abstrakt

Diplomová práce je tvořena dvěma hlavními pilíři. Prvním je úvod do teorie mezopického vidění od fyziologických závislostí zrakového aparátu po konečné výpočty světelně technických veličin v mezopických adaptačních podmínkách. Je zde diskutován způsob užití a praxe mezopické fotometrie s reálnými příklady s novými světelnými zdroji LED.

Druhým pilířem je návrh na úpravu veřejného osvětlení vozovky Blahoslavova, pro jejíž osvětlení byla použita svítidla se zdroji LED. Diplomová práce obsahuje údaje o současném stavu osvětlovací soustavy, který byl dokumentován měřením. Dále obsahuje postup zatřídění komunikace do třídy osvětlenosti a návrh na úpravu světelné situace tak, aby tato vyhověla požadavkům normy.

Klíčová slova

Veřejné osvětlení, LED zdroje, mezopické vidění, mezopické systémy, návrh osvětlení, teplota chromatičnosti, S/P ratio, Historie LED, fyziologie oka

Abstract

This diploma thesis is composed of two pillars. The first one is an introduction to the theory of mesopic vision, from physiological specifics of the vision apparatus, to final calculations of the technical lighting quantities in mesopic adaptation conditions. Practical uses of mesopic photometry with actual examples using new LED light sources are discussed.

The second pillar is a design proposal concerning the public lighting of the Blahoslavova roadway which uses LED light sources. The thesis gives an outline of the current state of the lighting system documented by measuring. It also contains the process of classifying said communication in the correct street-lighting category as well as a proposal of modifications needed for it to adhere to the norm.

Keywords

Public lighting, LED light source, mesopic vision, mesopic systems, S/P ratio, history of LED, physiology of the eye

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
C	kontrast	[-]
\bar{E}_m	udržovaná intenzita osvětlení	[lx]
E_m	průměrná osvětlenost	[lx]
E_{min}	minimální osvětlenost	[lx]
L	jas	[cd/m ²]
P	elektrický příkon	[W]
R_a	index barevného podání	[-]
S_λ	spektrální charakteristika zdroje	[lm/W]
T_c	teplota chromatičnosti	[K]
$V(\lambda)$	křivka průběh spektrální citlivosti zraku fotopického vidění	[lm/W]
$V'(\lambda)$	křivka průběh spektrální citlivosti zraku skotopického vidění	[lm/W]
$V''(\lambda)$	křivka průběh spektrální citlivosti zraku mezopického vidění	[lm/W]
W_{rok}	spotřeba elektrické energie za rok	[kWh/rok]
η	měrný výkon	[lm/W]
λ	vlnová délka	[nm]
ρ	činitel odrazu	[-]
Φ	světelný tok	[lm]

Zkratka	Význam
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
ČSN	Česká státní norma
GaAlAs	gallium hliník arsenid
GaAs	gallium arsenid
GaAsP	gallium arsenid fosfid
GaN	gallium nitrid
GaP	gallium fosfid
HPS	vysokotlaká sodíková výbojka (high pressure sodium)
InGaN	indium gallium nitrid
LED	světelná dioda (light-emitting diode)
LPS	nízkotlaká sodíková výbojka (low pressure sodium)
MH	metalhalidová výbojka (metal-halide)
PN	positive-negative
př. n. l.	před naším letopočtem
<i>S/P ratio</i>	poměr skotopické spektrální citlivosti k fotopické spektrální citlivosti
SI	základní jednotky SI (Le Système International d'Unités)
SiC	karbid křemíku
SMO	statutární město Ostrava

T5	zářivka typu T5
T8	zářivka typu T8
UV	ultrafialové záření
VO	Veřejné osvětlení

OBSAH

0	Úvod.....	1
1	Fyziologie zraku se zaměřením na oblast mezopického vidění.....	2
1.1	Zrak a vidění	2
1.1.1	<i>Fyziologický popis orgánu zraku</i>	2
1.1.2	<i>Sítnice a její části</i>	5
1.1.2.1	<i>Sítnice obecně</i>	5
1.1.2.2	<i>Čípky a tyčinky</i>	7
1.1.3	<i>Rozsah zrakového vjemu a adaptace zraku na světelné podmínky.....</i>	8
1.1.3.1	<i>Rozlišovací schopnost oka</i>	8
1.1.3.2	<i>Ostrost vidění v adaptačních hladinách</i>	9
1.1.3.3	<i>Adaptační mechanismy na světlo a tmu</i>	10
1.1.3.4	<i>Průběh adaptace.....</i>	11
1.1.3.5	<i>Adaptační poměry fotoreceptorů.....</i>	12
1.1.4	<i>Druhy vidění – fotopické, mezopické a skotopické.....</i>	14
1.2	Problematika mezopického vidění	15
1.2.1	<i>Adaptační hladiny mezopického vidění</i>	15
1.2.2	<i>Doporučený matematický zápis výpočtu mezopického vidění.....</i>	16
1.2.3	<i>Spektrální závislost mezopického vidění</i>	17
1.2.4	<i>Poměr S/P – S/P ratio</i>	18
1.3	Mezopické systémy	20
1.3.1	<i>USP-system</i>	20
1.3.2	<i>MOVE-System</i>	21
1.3.3	<i>Intermediate Systém – MES1 a MES2.....</i>	22
1.3.4	<i>Doporučený mezopický systém.....</i>	24
1.4	Mezopická fotometrie	24
1.4.1	<i>Návrh přístroje pro určování mezopických jasů a osvětleností.....</i>	24
2	Historie světelných zdrojů se zaměřením na LED	25
2.1	Historie světelných zdrojů.....	25
2.2	Historie zdrojů LED – světlo emitujících diod.....	27
2.3	Odhad vývoje v budoucnosti.....	29
3	Volba barvy LED v souvislosti s teplotou chromatičnosti a měrnými výkony.....	30
3.1	Vlastnosti barvy světla.....	30

3.1.1	Teplota chromatičnosti.....	30
3.1.2	Index podání barev R_a	32
3.2	Měrný výkon a volba teploty chromatičnosti.....	33
3.2.1	Měrný výkon.....	33
3.2.2	Kruithofův diagram.....	35
3.2.3	Vjem barvy světla při konstantní osvětlenosti.....	36
4	Návrh osvětlovací soustavy pomocí opticky podobných svítidel s vysokotlakými sodíkovými výbojkami a výkonovými LED	38
4.1	Normy pro osvětlování pozemních komunikací.....	38
4.1.1	Norma ČSN EN 13201(36 0455) a její části:.....	38
4.2	Vybraná lokace pro návrh, důvod jejího zvolení a cíl návrhu	39
4.2.1	Popis ulice Blahoslavova	39
4.2.2	Popis světelně činných objektů na ulici Blahoslavova.....	40
4.3	Postup návrhu	41
4.3.1	Stanovení třídy osvětlenosti.....	41
4.3.1.1	Postup zařazení do třídy osvětlenosti.....	41
4.3.1.2	Doporučení osvětleností přilehlých prostor.....	43
4.3.2	Návrhové programy	43
4.3.2.1	Návrhový program Lighting reality.....	43
4.3.2.2	Návrhový program DIALux 4.9.0.0	43
4.3.2.3	Zvolení udržovacího činitele	43
5	Objektivní i subjektivní posouzení realizované osvětlovací soustavy pomocí LED.....	44
5.1	Objektivní světelné podmínky na ulici Blahoslavova.....	44
5.1.1	Měření a výpočet fotometrických veličin na komunikaci Blahoslavova.....	44
5.1.1.1	Měření jasu	44
5.1.1.2	Měření spektrálních charakteristik	44
5.1.1.3	Výpočet poměru S/P ratio	48
5.2	Subjektivní mezopické světelné podmínky na ulici Blahoslavova	49
5.2.1	Úprava hodnot klasifikace třídy S4 pro mezopické vidění.....	49
5.2.1.1	Vstupní hodnoty	49
5.2.1.2	Přepočet fotopických fotometrických hodnot dle systému MES2.....	50
5.2.1.3	Převod mezopických jasů do fotopických hodnot	51
5.2.2	Výpočet mezopického jasu na ulici Blahoslavova.....	52
6	Vyhodnocení vypočtených osvětlovacích soustav z pohledu kvalitativních i kvantitativních parametrů	54

6.1	Měření osvětleností současných osvětlovacích soustav na ulici Blahoslavova ..	54
6.1.1	<i>Měření soustavy se zdroji HPS.....</i>	54
6.1.2	<i>Výsledky měření soustavy se zdroji LED.....</i>	55
6.2	Návrhy osvětlovacích soustav	56
6.2.1	<i>Návrh původní osvětlovací soustavy s LED zdroji.....</i>	56
6.2.2	<i>Návrh nové osvětlovací soustavy s LED zdroji</i>	57
6.3	Vyhodnocení dalších parametrů.....	59
6.3.1	<i>Světelné parametry.....</i>	59
6.3.2	<i>Energetické parametry osvětlovacích soustav ulice Blahoslavova.....</i>	60
7	Závěr	61
8	Použité zdroje	63
	Seznam příloh	68

0 Úvod

Veřejné osvětlení je aplikací velmi přínosnou, neboť dovoluje lidem aktivní život v časech a prostředích, kde by jinak nebyl. Přispívá nejen k orientaci a základním vizuálním úkonům, ale také k bezpečnosti a kultuře. Vzhledem ke své rozsáhlosti a snaze provozovatelů veřejných osvětlení o co největší energetické úspory se do této oblasti začínají dostávat také nové světelné zdroje LED.

V době rozmachu těchto nových světelných zdrojů, které jsou díky svým vlastnostem technicky velmi atraktivní, přichází rozpracovaná problematika mezopického vidění, jehož oblast užití pojímá právě aplikace veřejného osvětlení, či osvětlení nouzového. Zvláštností mezopického vidění je účast fotoreceptorů čípků i tyčinek na procesu vidění. Tím vzniká smíšené vidění závislé na vyzařovaném spektru zdroje, kdy vyzařování v oblasti kratších vlnových délek odpovídá silnějšímu vjemu světla a právě tento fakt nahrává světelným zdrojům LED, jejichž světlo v podmínkách mezopického vidění je pro pozorovatele subjektivně jasnější, než světlo z klasického světelného zdroje, jakým je například vysokotlaká sodíková výbojka.

První bod bude věnován popisu fyziologie zrakového aparátu a jeho vjemovým odezvám na světelné podněty. Z tohoto popisu pak bude definována podstata mezopického vidění, na což naváže popis mezopických systémů s ambicemi definovat spektrální průběhy vidění v této adaptační hladině.

Druhý bod poskytne náhled od historie světelných zdrojů. Zvláštní pozornost pak bude věnována zdrojům LED s odhadem jejich vývoje v budoucnosti.

Třetí bod nabídne přehled a popis základních parametrů emitovaného světla jako je index podání barev či teplota chromatičnosti světelného zdroje. Společný vliv těchto parametrů na lidskou psychiku a vnímání bude předmětem druhé poloviny tohoto bodu.

Čtvrtý bod bude úvodním bodem k bodům následujícím. Popis světelné situace na vozovce Blahoslavova bude doplněn o schematické zařazení komunikace do příslušné třídy osvětlenosti.

Pátý bod nabídne problematiku praktických výpočtů mezopických hodnot osvětleností a jasů. A to jak na konkrétním příkladu vozovky Blahoslavova, tak na obecném případě přízpůsobení hladin osvětleností vozovek třídy S4 pomocí vybraných světelných zdrojů.

V posledním bodě diplomové práce se bude nacházet zhodnocení měření světelně technických parametrů již existující osvětlovací soustavy s LED zdroji v porovnání se soustavou původní, osazenou vysokotlakými sodíkovými výbojkami. K tomu bude náležet i vyhodnocení nově navržené soustavy, která by měla vyřešit neuspokojující současnou světelnou situaci vozovky Blahoslavova.

1 Fyziologie zraku se zaměřením na oblast mezopického vidění

1.1 Zrak a vidění

Jedním z pěti smyslů, kterými je člověk obdařen, je i zrak. Pokud chceme zkoumat zrak či vidění obecně, je třeba mít na mysli širokost celého tématu, které může začínat od samotného zrodu světelného záření až lidského chování v závislosti na vnímaném osvětlení. Důležitým aspektem je také nepopiratelný fakt, že se lidské oko vyvíjelo ve světelných podmínkách na Zemi. Je tedy třeba brát zřetel také na tyto okolnosti, kterým se vidění a vnímání okolního prostředí přizpůsobovalo.

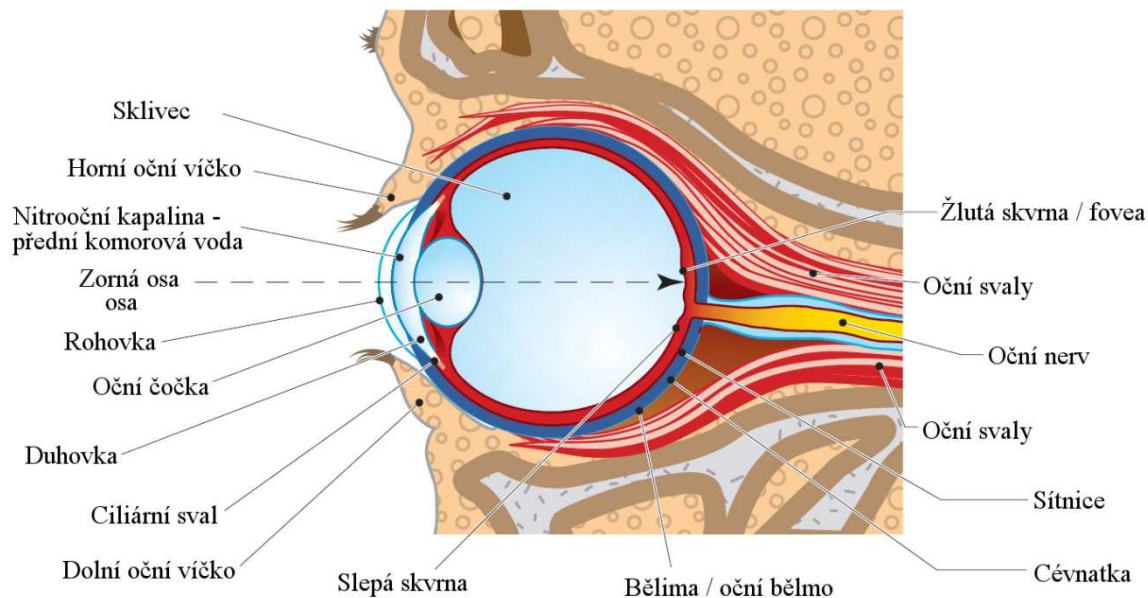
Že je vidění pro člověka důležité může reprezentovat například už jen fakt, že 80% veškerých informací o okolí je získáno zrakem. Oko lidem poskytuje možnost vnímat paprsky světla jakožto nosiče informace, které jsou následně setříděny ve zrakovém centru mozku. Ten pak nejenže, splňuje funkci konečného vidění tak, jak jej známe, ale také dle informací o světle v prostředí, kde se nacházíme, upravuje vnitřní biorytmy.

1.1.1 Fyziologický popis orgánu zraku

Celkovému vnímání okolí zrak přispívá rozeznáváním barev, tvarů, kontrastů, a tedy i kontur. Funkci vidění můžeme rozdělit do tří částí, které ji zprostředkovávají. První částí je oko samotné – nazýváme jej částí *periferní*. Zrakové nervy vedoucí nervové vzruchy vyvolané světelným podrážděním fotocitlivých buněk jsou částí druhou – *spojovací (spojová)*. Třetí část se jmenuje *centrální* – podkorové a korové části mozku, kde je obrazová informace zpracována do finální podoby. [14]

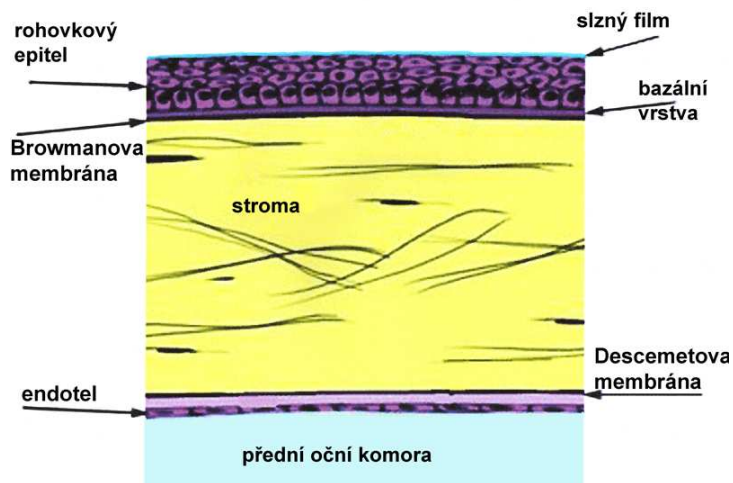
Zrakový orgán obr. 1 je tvořen oční koulí a dalšími orgány, které napomáhají funkci oka. Jímí jsou například okohybné svaly, spojivka, víčka a slzný aparát. Oční koule, která má průměr cca 24 mm, je ve své přední části zakřivena více než v zadní části, kde je poloměr zadního segmentu větší.

Hlavními prvky optické části je rohovka, oční čočka a duhovka. Rohovka zprostředkovává zhruba 2/3 refrakčního mechanismu – optické mohutnosti oka. Oční čočka má pak za úkol jemné doladění a zaostření na konkrétní cíl v rozmezí od cca 10 centimetrů do 6 metrů. [12]



Obr. 1 Zrakový orgán [24]

Rohovka je téměř kruhového tvaru a je vypouklá směrem od oka. Její zakřivení se liší případ od případu a také se mění u konkrétního jedince s rostoucím věkem. Její tloušťka je od 0,5 mm ve středu do 1,1 mm na jejím okraji a skládá se z 5 vrstev obr. 2.



Obr. 2 Řez rohovkou [45]

První vrstva (směrem do oka) se nazývá rohovkový epitel. Je to vrstva jen několik buněk silná, avšak má zásadní funkci chránit oko před podněty z vnějšího okolí. K tomu jí pomáhá

regenerace buněk společně s jejich dělením, kdy se staré a odumřelé buňky odplavují pomocí slzného filmu na povrch oka..

Třetí (prostřední) vrstva zvaná stoma tvoří až 90% tloušťky rohovky. Vytváří ji nebuňková vlákna kolagenu prokládána buňkami stomatu, která tato vlákna vytváří, a zároveň slouží k vyživování a údržbě těchto vláken, která jsou dokonale průhledná.

Pátá vrstva se nazývá endotel. Její funkcí je regulace tekutin a výživy, která touto vrstvou přichází z komorové vody nacházející se mezi rohovkou a čočkou v přední oční komoře. Na rozdíl od buněk epitelu (první vrstvy) nemají buňky páté vrstvy schopnost regenerace. Odumřelé buňky se smrští a tím se pevnost této vrstvy oslabuje, až může dojít k porušení izolačních schopností endotelu, jehož následkem je snížení transparentnosti rohovky.

Duhovka je spjata s řasnatým tělískem a tvoří průchozí bránu pro světelné paprsky vnikající do oka. Díky tomu, že duhovka je tvořena také svaly, má možnost se smršťovat, takže tvar jejího mezikruží se může uzavírat a tím regulovat množství světla dopadajícího na sítnici.

Na řasnatém tělísku, které je součástí cévnaté vrstvy oka, je také zavěšena oční čočka. Její tvar je bikonvexní, upravuje se však pohybem (tahem) radiálních a meridionálních vláken cirkadiálního svalu. Tím se zajišťuje změna indexu lomu světla v případě akomodace. Během života čočka postupně mohutní, takže z původní velmi elastické čočky o tloušťce cca 3,5 mm při narození je ve stáří již těžko akomodovatelná a cca 4mm tlustá čočka.

Sklivec vyplňuje prostor oční koule a má za úkol udržovat hladinu nitroočního tlaku. Je tvořen z 98 % vodou. Zbytek jeho stavby obsahuje soli, bílkoviny, kyselinu hyaluronovou (příčina rosolovité konzistence) a jiné látky. Sklivec je čirý a průhledný. Neregeneruje se a obsah oční koule je doplňován v průběhu života komorovým mokem. [50]

Bělima, či jinak zvaná taky oční bělma, je pevný obal oka, který udržuje jeho tvar a tvoří 80 % jeho povrchu. Je tvořena především kolagenem a elastickými vlákny. Jejím úkolem je chránit oko od vnějších vlivů. Její hladký povrch je přerušen jen výstupem očního nervu a s ním sousedících žil pro vtok a odtok krve na zadní straně oka. V přední části je pak přerušen částmi zprostředkovávajícími vstup světla do oka. Z vnější strany má bílou barvu, z vnitřní je pak hnědý pigment, který je vrásčitý a protkaný žilami cévnatky. Uváděná tloušťka stěny bělimy je od 0,3 mm do 1,5 mm s tím, že silnější část stěny se nachází v zadní části oční koule. K ní jsou upnuty okohybné svaly. Jejich délka je zhruba 4 cm a šířka úponu cca 1 cm. [36], [21], [13], [44]

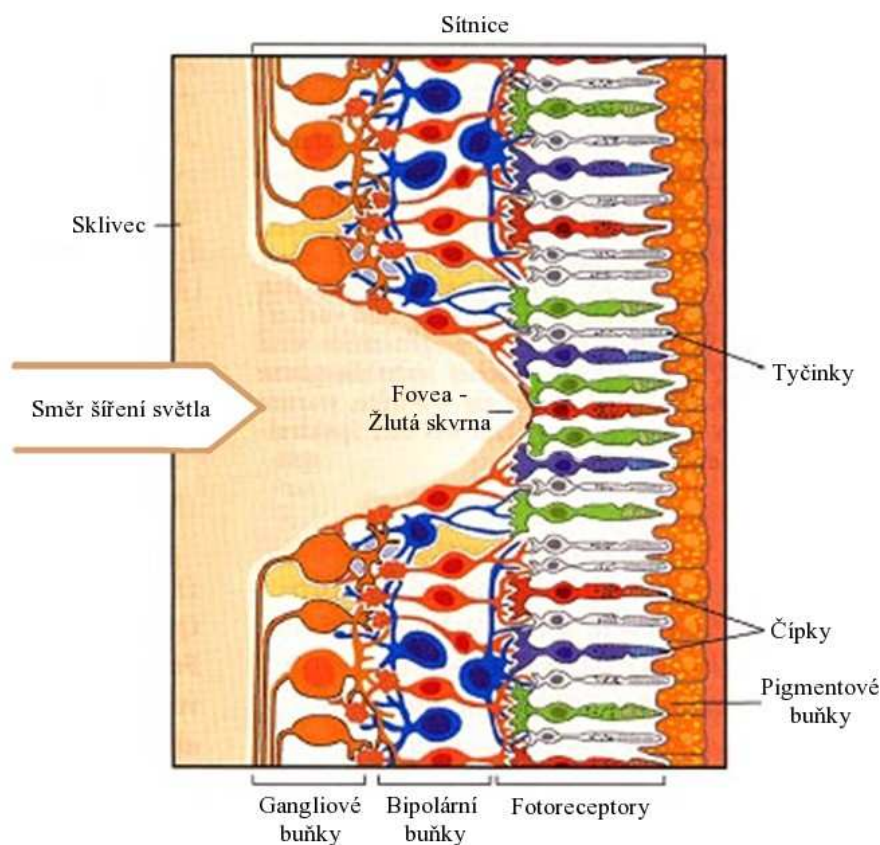
Cévnatka je druhou vrstvou po bělimě. Její barva je tmavě hnědá – to z důvodu zabránění rozptýlům a odrazům světla v oční kouli. Cévnatka je hustě protkána cévami, které vyživují celé oko a také fungují jako tepelný regulátor. Odvádí jak teplo vzniklé při chemických procesech po dopadu světla na fotoreceptory, tak teplo přivedené světelným paprskem do oka např. za slunného dne. V přední části cévnatka přechází v řasnaté tělísko. [18], [40], [13]

1.1.2 Sítňice a její části

1.1.2.1 Sítňice obecně

Sítňice je třetí vrstvou obalu oka (obr. 1). Těsně přiléhá k cévnatce a v přední části oka přechází v řasnaté tělísko stejně jako cévnatka. Na sítnici můžeme jasně rozeznat slepou skvrnu, která je místem, kde do oka vstupuje oční nerv a kde nejsou přítomny žádné fotočivné receptory. Naopak největší koncentraci fotoreceptorů najdeme v místě zvaném žlutá skvrna, jejímž centrem je fovea nacházející se v optické ose oka. Žlutá skvrna má v průměru cca 5 mm a fovea v jejím středu má průměr cca 1 mm. Barva žluté skvrny ve skutečnosti u živého člověka není žlutá, ale je spíše načervenalější, než zbytek okolní tkáně. Jméno žlutá dostala podle toho, že jako žlutá se jeví u nebožtíků.

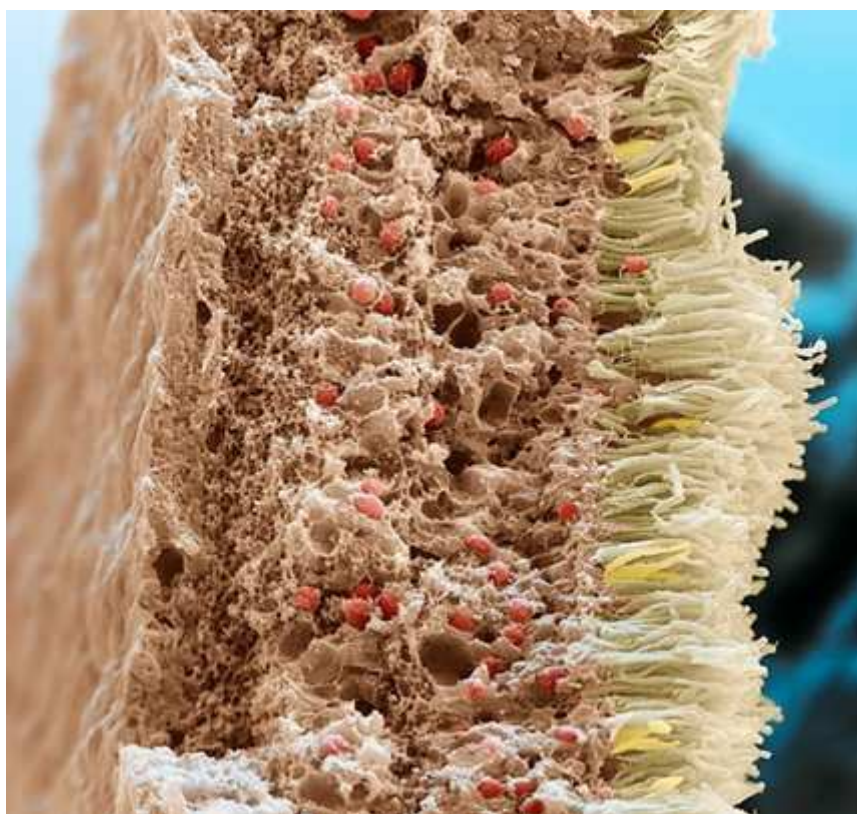
Sítňici můžeme rozdělit do 10 vrstev. Některé svou funkcí zprostředkovávají podpůrné procesy vidění, jako například pigmentové buňky. Ty mají za úkol pohltit již zpracované světlo, aby v oční bulvě nevznikaly odrazy mající negativní vliv na zpětné vnímání světla přicházejícího do oka. V jiných vrstvách jsou obsaženy nervové buňky zprostředkovávající přenos světelné informace na informaci nervového vzruchu. Řez sítnicí je naznačen na obr. 3.



Obr. 3 Řez sítnicí [53]

Ve foveální části sítnice se nacházejí jen fotočivné receptory čípku. Není zde struktura bipolárních či gangliových buněk, jako je tomu u zbytku sítnice. Každý fotoreceptor z této části má svůj vlastní nervový výstup přes vlastní gangliovou buňku. Díky tomu se zde nachází oblast nejostřejšího vidění.

Bipolární a gangliové buňky mají za úkol sdružovat výstupy fotoreceptorů a předzpracovávat jejich nervový vzruch. Taková uskupení světločivných buněk k vyšší nadřazené nervové buňce se nazývají vjemová pole. Směrem od žluté skvrny k čočce oka se počet fotoreceptorů připadajících na jednu gangliovou buňku v jednom vjemovém poli zvyšuje až na tisíce receptorů. Počet příslušných receptorů k jedné takové buňce není pevný, ale může se měnit dle aktuální potřeby adaptace zraku.

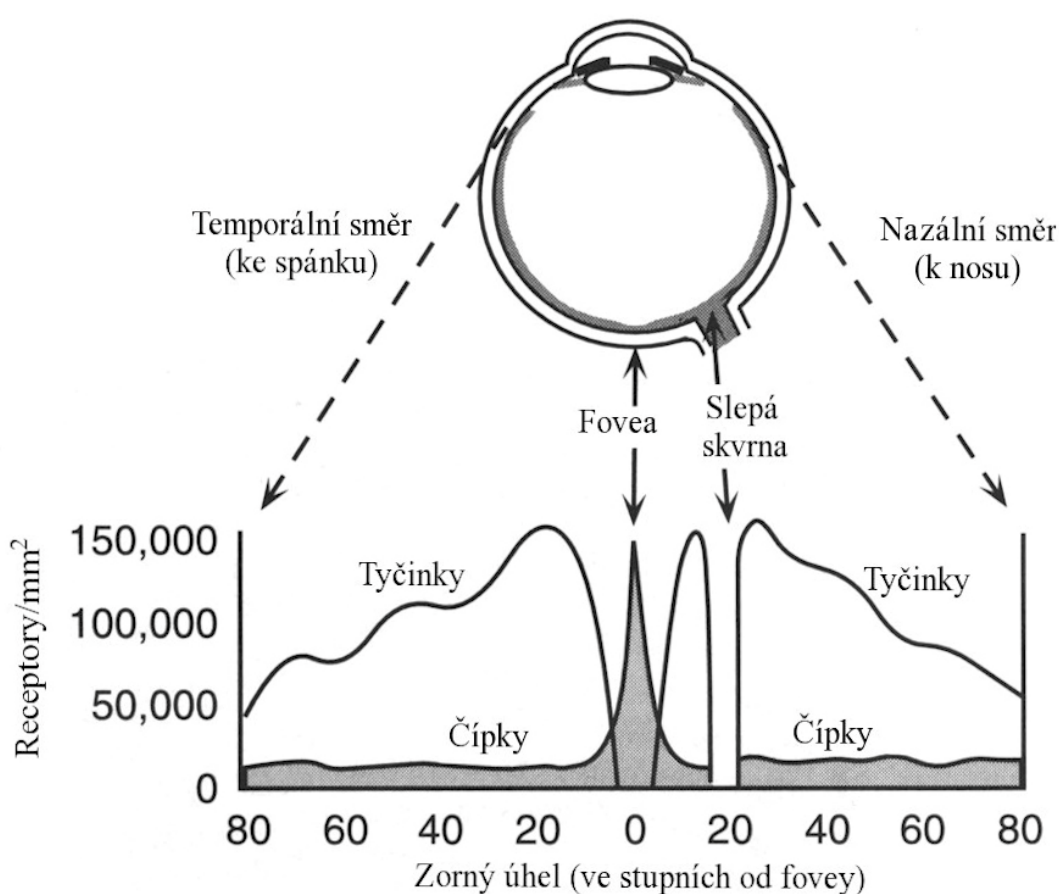


Obr. 4 Zvětšený řez sítnicí [32]

Na obr. 4 je snímek řezu sítnicí zhruba osmisetnásobně zvětšený a renderovaný nepravými barvami. Směr šíření světla je znázorněn na levé straně obrázku. Červenou barvou jsou naznačeny gangliové a bipolární buňky, žlutou čípky, zelenou tyčinky a hnědou pak zbývající části sítnice. [32]

1.1.2.2 Čípky a tyčinky

Světlo musí prvně projít skrze vrstvy nervových buněk sítnice, než dosáhne fotočivných receptorů. Ty jsou trojího typu - dva z nich zprostředkovávají vidění a třetí je využíván k úpravě cirkadiálních rytmů. Světločivné buňky dělíme na tyčinky a čípky, jejich rozložení na sítnici je naznačeno na obr. 5. Čípků je asi 7 milionů. Jsou koncentrovány okolo žluté skvrny a směrem od ní jejich hustota rapidně klesá. Tyčinky, kterých je asi 120 milionů, nejsou obsaženy ve žluté skvrně, ale jsou koncentrovány okolo žluté skvrny a směrem k přední části oka jich opět ubývá (jak naznačuje obrázek obr. 5). V místě vstupu očního nervu, tzv. papile, se nenacházejí žádné fotoreceptory.



Obr. 5 Rozložení čípků a tyčinek na sítnici [54]

Čípky se dále dělí na tři druhy zprostředkovávající vidění ve třech základních barvách. Procentuální rozložení jednotlivých druhů čípků je 64 % pro „červené“ spektrum, 32 % pro „zelené“ spektrum a 2 % pro „modré“ spektrum. Čípky reagující na „červené“ a „zelené“ spektrum můžeme najít v centrální části fovey. „Modré“ čípky, které mají sice větší citlivost, ale zato je jich výrazně méně, jsou rozesety kolem žluté skvrny. Početní nevýhoda „modrých“

receptorů je vyvážena jejich citlivostí a úpravou (zesílením) síly signálu při zpracování v mozku. [19]

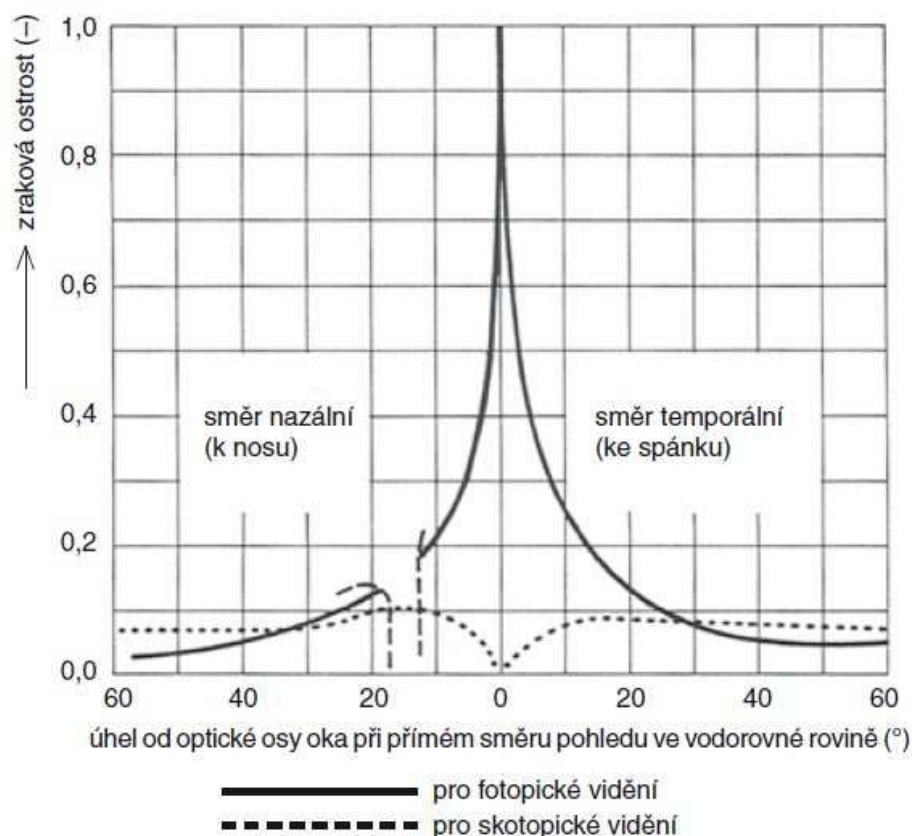
Úlohou všech čípků je barevné a ostré vidění. Jejich aktivita se uvádí od pozorovaných jasů 0,001 či 0,01 cd/m². Vidění, které je považováno za čípkové, je od jasů 10 cd/m². O čistém čípkovém vidění můžeme mluvit až od hodnoty jasu nad 100 cd/m². O rozložení jejich aktivity dle adaptačních jasů pojednává obr. 11. [37], [39], [12]

Tyčinky jsou druhým typem fotoreceptoru na sítnici zprostředkovávajícím vidění. Jejich spektrální odezva jakožto druh vidění, ve kterém se uplatňují, je naznačena na obr. 11. Hlavní charakteristikou je vyšší citlivost na světelný podnět a mez adaptačních jasů, kdy jsou aktivní. Jsou citlivější než čípky a to až 1000násobně. Tyčinky poskytují jen monochromatické vidění. Nerozlišují jednotlivé barvy. Při pohledu na adaptační meze tyčinek obr. 9 můžeme říci, že se jejich význam ve vidění dá považovat za přínosný až v pásmu mezopického vidění – zhruba od 10 cd/m² a méně, i když jejich aktivitu můžeme předpokládat od jasů 100 cd/m². Vlivem svého rozložení na sítnici obr. 5 zprostředkovávají část periferního vidění za běžných (denních) adaptačních jasů a také noční vidění, kdy periferní vjem pozorovaného detailu či objektu poskytuje vyšší míru informace než pohled foveální – tedy pozorování v ose pohledu. [43], [12], [15]

1.1.3 Rozsah zrakového vjemu a adaptace zraku na světelné podmínky

1.1.3.1 Rozlišovací schopnost oka

K rozlišení detailů a předmětů se při zrakové činnosti používá způsob na základě porovnávání jasností pozorovaných objektů. Informace z oka jsou vyhodnocovány v mozku. Proces vidění, rozkladu a opětovné skládání obrazu s jeho identifikací a rozpoznání jsou velmi podobné Fourierově analýze. Tímto zjištěním založeným na základě výzkumu vjemových polí je odmítána teze, dle které je zraková ostrost omezena vzdáleností dvou fotoreceptorů, mezi nimiž je jeden neozářený. Průběh zrakové ostrosti je naznačen na obr. 6. [14]



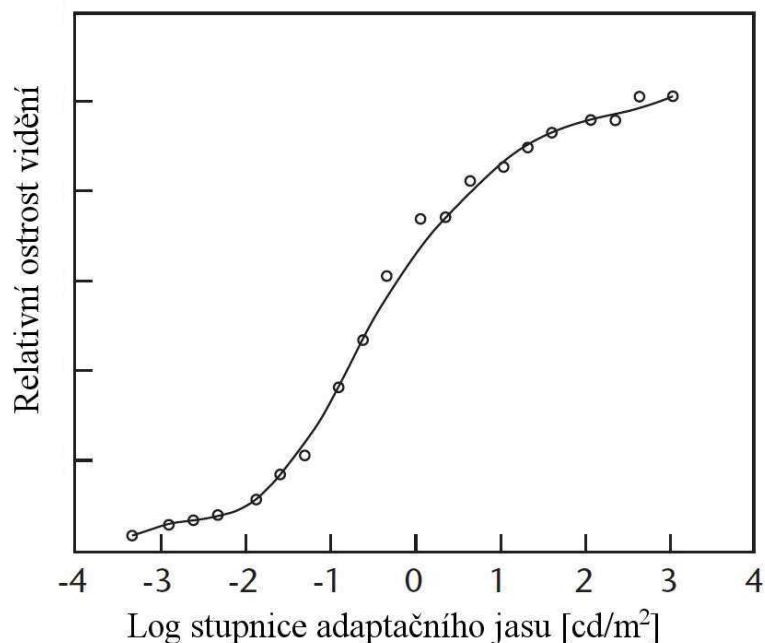
Obr. 6 Graf relativní ostrosti vidění [14]

Graf na obr. 6 jasně popisuje průběh relativní ostrosti vidění pro čípky i tyčinky. Čípkové vidění charakteristické pro denní adaptační jasy je zdrojem ostrého obrazu. Vidíme, že nejvyšší ostrost je soustředěna na jedno místo – tím je fovea obsahující pouze čípky. Tyčinkové noční vidění není s to při nízkých jasech rozlišovat předměty tak ostře, jako je tomu u předchozího případu. Navíc jsou oblasti nejlepší relativní ostrosti u tyčinek situovány okolo středu pohledu. Experimentálně bylo zjištěno, že například při nočních zrakových úkolech, jako je řízení vozu či bezpečnostní dohled, jsou podněty mimo střed pohledu vnímány s kratší reakční dobou. [20]

1.1.3.2 Ostrost vidění v adaptačních hladinách

Různé hladiny adaptačních jasů ovlivňují také vjem a míru ostrosti, jakou zrakový orgán poskytuje. Výsledná kvalifikace vidění vycházející z průběhu na uvedeném grafu ostrosti zraku na obr. 7, je v tomto případě vyjádřena ve formě Snellenova zlomku. Ten vychází z oné známé tabule se zmenšujícími se písmenky u očního lékaře. Poměr zlomku prvního písmena „E“ je 20/200. Tento zlomek je udáván ve stopách. Po přepočtu na metry je to 6/60. První číslo udává vzdálenost, z jaké přečte správně písmeno člověk s vadou zraku bez optických pomůcek. Druhé číslo udává vzdálenost, z jaké je schopen rozlišit písmeno člověk s průměrným zdravým

zrakem. Za nositele normálního, zdravého zraku se považuje člověk, který přečte písmena osmého řádku, kde hodnota zlomku je 20/20, respektive v SI 6/6. [42]



Obr. 7 Graf závislosti ostrosti vidění na adaptační úrovni jasu [12]

Z grafu můžeme odvodit, že výkon definované zrakové činnosti klesá se zmenšujícím se jasnem místa či jasnem kritického detailu zrakového úkolu. Stejně tak míra odezvy rychlosti rozlišení detailu roste s rostoucí intenzitou osvětlení, avšak i v tomto případě se křivka postupně kloní k horizontální ose u svého maxima. Namáhání očí způsobuje únavu a ty již nejsou s to nadále podávat zrakový výkon se zvyšující se tendencí. Pro nejvyšší jasy denních adaptačních podmínek byla ostrost dle obr. 7 vidění udaná v Snellenově zlomku až 20/10. V jednotkách SI je to pak 6/3. Pro jasy nočních podmínek ostrost vidění klesla až na hodnotu 20/300, neboli v SI na 6/90. [12], [15], [42]

1.1.3.3 Adaptační mechanismy na světlo a tmu

Zrakový systém používá několik adaptačních mechanismů. Nejjednodušším je fotopupilární reflex neboli změna průměru zorničky. Její průměr se může měnit v rozsahu až 1:20. Tento způsob regulace množství fotonů, které pronikají do oční koule, však nepatří k příliš účinným.

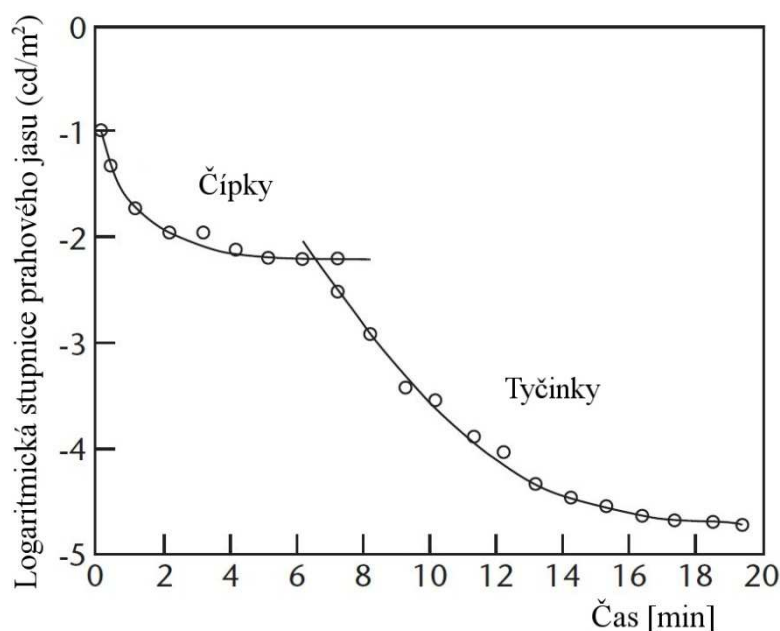
Dalším mechanismem adaptace je fotochemický děj, který se odehrává ve fotočivných receptorech. Každý druh na světlo citlivých buněk v sítnici má svůj konkrétní druh pigmentu.

Od jejich vlastností se odvíjí většina adaptačních průběhů. Určuje jej čas rozpadu či syntézy pigmentu. Ten je závislý na předchozí adaptační hladině osvětlení a také na vlnové délce adaptačního světla. Při jistých vlnových délkách je totiž rozpad pigmentu rychlejší.

Nejdokonalejším mechanismem je pak změna velikosti vjemových polí, kde nastávají procesy nervové adaptace. Průměr těchto polí se zmenšuje s rostoucí intenzitou osvětlení a naopak zvětšuje při adaptacích na tmu, aby mohla zachytit větší procento fotonů dopadajících na sítnici. Někdy se také mohou vzájemně překrývat.

1.1.3.4 Průběh adaptace

Oko nemá schopnost okamžité readaptace na hladiny různých osvětleností. Přechody mezi různými světelnými prostředími vyžadují čas pro přizpůsobení se novým podmínkám. Obr. 8 uvádí křivku adaptace na tmu, tedy přechod z prostoru s vyšší hladinou osvětlenosti do prostoru s nižší hladinou či do úplné tmy.



Obr. 8 Průběh adaptace na tmu [12]

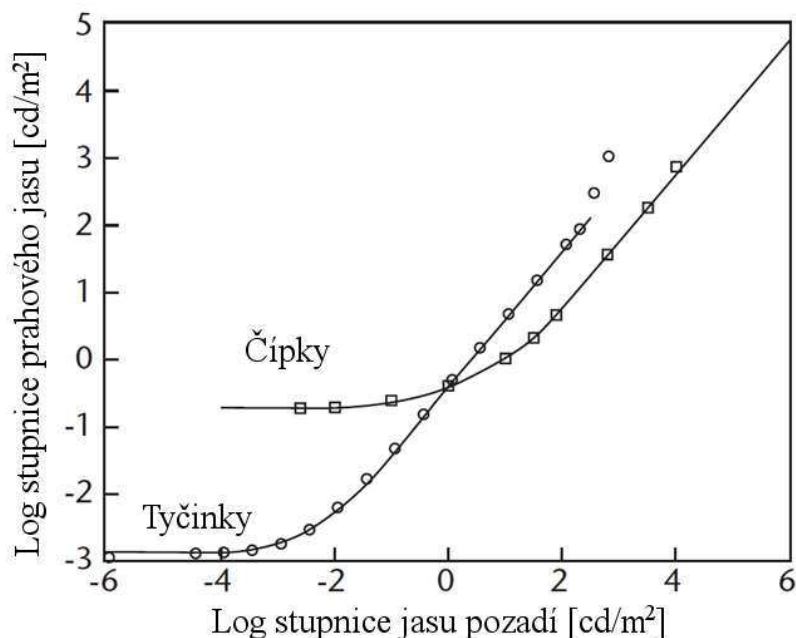
Z naznačeného grafu můžeme pozorovat, že v první fázi adaptace na tmu stále ještě fungují čípky. Jejich citlivost na světlo roste po dobu přibližně osmi minut s tím, že v první půlce tohoto času se citlivost zvyšuje velmi rychle. Zlom v průběhu křivky se nazývá Kohlrauschův ohyb, nebo také Purkyňův zlom. Jedná se projev přechodu fotopického (čípkového) vidění do fáze skotopického (tyčinkového) vidění. Tím se také křivka dostává do své druhé fáze. Citlivost tyčinek na světlo dosahuje praktického maxima po 20 minutách,

kdy je křivka grafu téměř vodorovná. Některá literatura uvádí 35 minutovou adaptaci jako dosažení měřitelného maxima [12]. Jiná tvrdí, že je zde registrovatelný přírůstek citlivosti po dalších cca 30 minutách, který je však již téměř zanedbatelný. Další zvyšování citlivosti se může údajně dít dalších 24 – 48 hodin.

Adaptace na světlo má oproti adaptaci na tmou poněkud jiný časový a psychologický průběh. Pokud vstoupíme do prostoru, kde je tma z prostoru dobře osvětleného, na relativně dlouhý moment, který může trvat až minuty, jsme oslepeni tmou a nejsme schopni ani základní orientace. Pokud nastane taková situace v opačném případě, kdy se ocitáme v prostoru s výrazně vyšší hladinou osvětlenosti, než odkud přicházíme, je plná adaptace na vyšší hladinu osvětlenosti záležitostí momentů, maximálně jednotek minut oproti desítkám minut u adaptace na tmou. Navíc nedochází k naprosté ztrátě orientace v prostoru na několik minut jako u případu adaptace na tmou, ale po několika momentech jsme schopni se orientovat, i když máme psychologický vjem silného závojového jasu.

1.1.3.5 Adaptační poměry fotoreceptorů

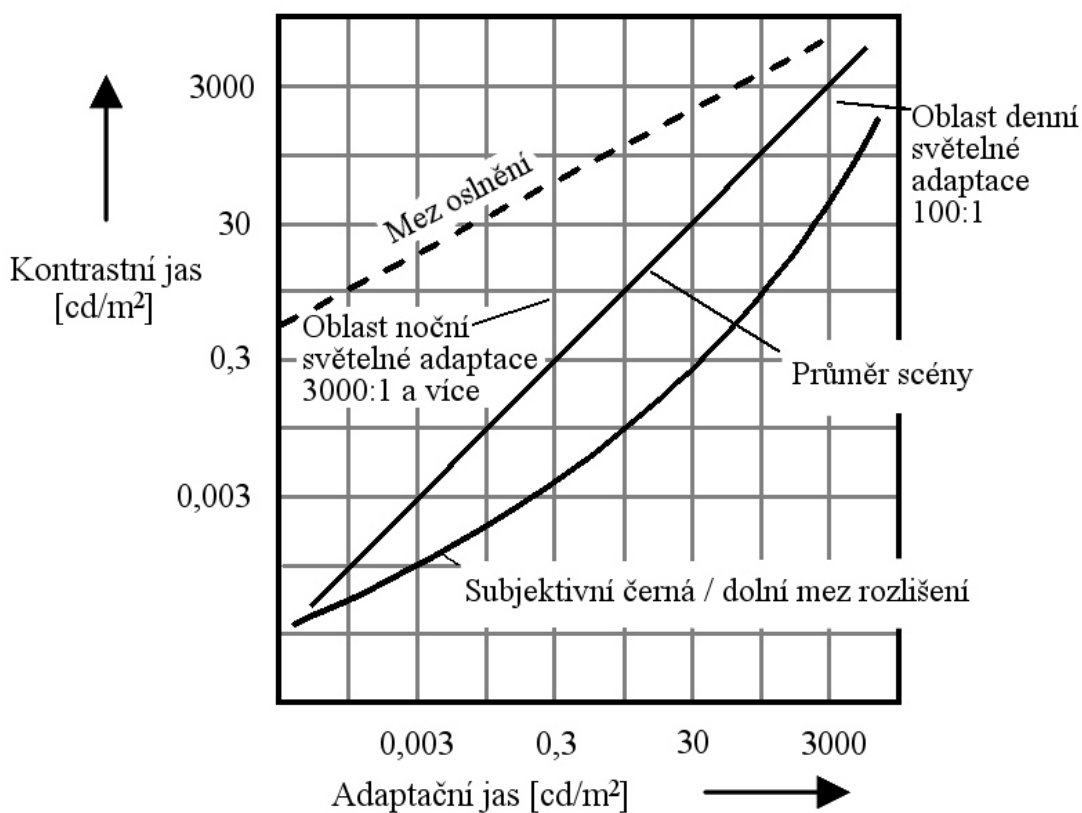
Základem vidění a rozpoznávání kontur je schopnost oka vnímat rozdílné jasy. Obr. 9 ukazuje graf průběhu citlivostí čípků a tyčinek na základě registrovaného prahového jasu, neboli kontrastu podnětu k jasů pozadí, na které je pozorovatel adaptován.



Obr. 9 Citlivost čípků a tyčinek pro jednotlivé adaptační úrovně [12]

Horizontální část křivky náležící tyčinkám, která je zhruba do hodnoty adaptačního jasu počátku rozlišovací schopnosti $-4 \log \text{ cd/m}^2$, vypovídá o tom, že adaptační jas v těchto hodnotách v podstatě nemá vliv na změnu reakce minimálního světelného podnětu. Tím se ukazuje spodní limitní hranice vizuálního systému oka. Na druhé straně křivky tyčinek, nad hodnotou adaptace $2 \log \text{ cd/m}^2$, se křivka začíná blížit svislé asymptotě, což svědčí o saturaci tyčinek a jejich další neschopnosti vnímat rozdíly jasů. Mezi těmito krajními hodnotami se nachází střední část křivky. Ta je lineární a můžeme ji popsat Weber-Fechnerovým zákonem říkajícím, že intenzita smyslového vjemu je logaritmicky závislá na intenzitě fyzikálního podnětu. Křivka čípků od $2 \log \text{ cd/m}^2$ také respektuje svou linearitou Weber-Fechnerův zákon. Pod hranicí $-2,6 \log \text{ cd/m}^2$ jsou čípky již netečné na vizuální podmět. [12]

S takovými možnostmi adaptací a vzruchové odezvy fotočivných receptorů je pracovní rozsah očního ústrojí, potažmo celého zrakového smyslu, obrovský. Ale i tento systém má svá omezení. Nejsou jimi jen spodní a horní hranice adaptačních jasů, ale také oslnění. Je to stav, kdy se v zorném poli oka, které je adaptováno na určitou hladinu jasu, vyskytne zdroj jasu hodnoty vyšší, než je adaptabilní rozsah vjemové soustavy. Oko tedy ovlivňují časové a prostorové kontrasty pozorovaných jasů. Hodnoty oslnění kontrastem jsou znázorněny na obr. 10. [15]



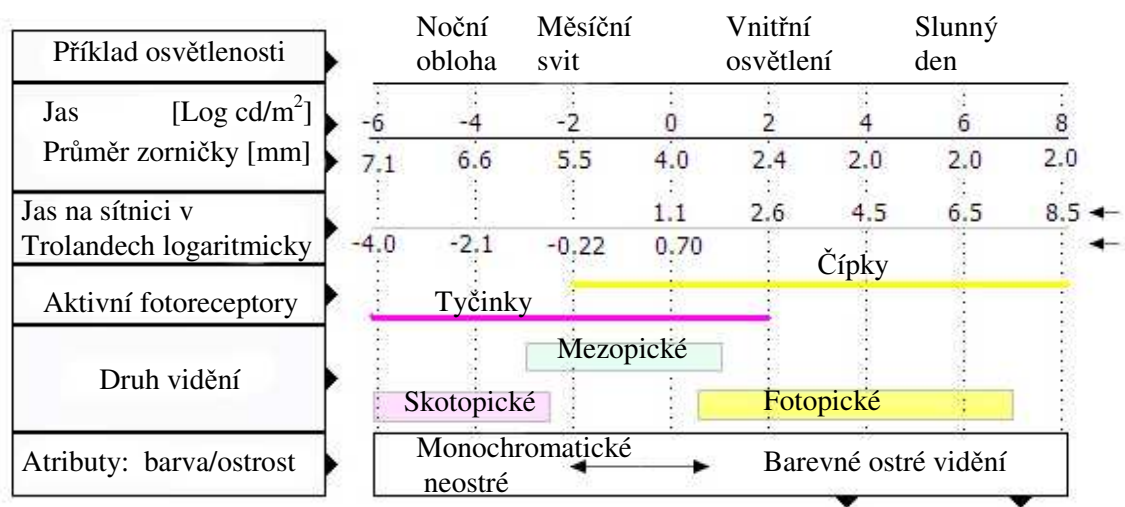
Obr. 10 Rozsah vnímání jasů a oslnění [26]

Na vodorovné ose obr. 10 je uveden adaptační jas pozorovatele. Přímka „průměr scény“ nám pak ukazuje průměrný jas (adaptaci), kde pozorovaný detail v zorném poli má stejný jas jako jas jeho okolí. Na svislé ose je tedy hodnota jasu pozorovaného detailu. Pokud má pozorovaný detail výrazně menší hodnotu jasu, pak se jeví jako subjektivně černý – neosvícený. Při vyšší hodnotě pak nastává oslnění pozorovaným detailem.

Z grafu je zřejmé, že rozsah pozorovatelných kontrastů není shodný pro všechny adaptační hladiny. Pro noční prostředí je pozorovatelný rozsah kontrastů 3000:1 a více, kdežto pro denní adaptaci je to hodnota přibližně rovná poměru 100:1. [26]

1.1.4 Druhy vidění – fotopické, mezopické a skotopické

Pro různé adaptační jasy, lépe řečeno pro jejich jistá rozmezí, definujeme průběh vidění, jako např. funkci čípků, tyčinek či jejich kombinací, pomocí křivek spektrální citlivosti. Tyto jasy odpovídající jednotlivým typům vidění jsou rozděleny do 3 skupin, jejichž grafický popis společně s doplňujícími informacemi je na obr. 11. Jedná se o vidění fotopické, mezopické a skotopické.



Obr. 11 Grafický popis jednotlivých druhů vidění [38], [49]

Fotopické vidění $V(\lambda)$ je adaptace lidského oka na jasy za běžného denního osvětlení a jasové poměry. Jedná se o jasy od 3 cd/m² až po hodnoty 106 cd/m² a vyšší, které jsou už lidskému oku nebezpečné. Při tomto vidění jsou světelné vjemy v oku zpracovávány čípkami, což vede k barevnému a maximálně ostrému vidění realizovanému v přímém pohledu na pozorovaný předmět. Nejvyšší hodnota průběhu křivky fotopického vidění na obr. 12 je na hodnotě 683 lm/W při světelném podnětu o vlnové délce 555 nm. Jak je patrné z průběhu

fotopické křivky, je reakce na světelné podněty o různých vlnových délkách různá. Lidské oko se tak co nejvíce přizpůsobilo spektrální charakteristice Slunce. [16], [12]

Skotopické vidění $V'(\lambda)$, o kterém mluvíme v případě adaptačních jasů udávaných v rozmezí od 0,01 cd/m² – 0,001 cd/m² až do hodnoty minimálního viditelného stimulu, je realizováno pouze tyčinkami. Vidění je tedy monochromatické (černobílé), v porovnání s viděním fotopickým realizovaným čípkami také relativně neostré, jak popisuje obr. 6. Křivka spektrálního průběhu skotopického vidění má svou maximální hodnotu při 507 nm na hodnotě světelné účinnosti záření 1700 lm/W – obr. 12. Při tomto vidění reaguje oko lépe na světelné podněty, které přicházejí z periferních částí zorného pole, tedy mimo osu nejostřejšího vidění, což je dáno rozložením tyčinek na sítnici dle obr. 5. [16], [12]

Mezopické vidění $V''(\lambda)$, je oblast vnímání oka, kdy se na zpracování světelných podnětů podílejí jak čípkami, tak tyčinkami. Adaptační jasy pro tento druh vidění nejsou jednoznačně dány. Tento údaj se může lišit dle jednotlivých výzkumů a názorů. Obecně se dá říci, že vidění mezopické je přechodovým pásmem vidění skotopického a fotopického. Pro praktické účely uvažujeme adaptační jasy od 0,001 cd/m² (CIE, 1978) do hodnot zhruba 10 cd/m². Tato hodnota však nemůže být přesně definována, neboť závisí na mnoha ovlivňujících faktorech, jako je například velikost a pozice pozorovaného objektu v zorném poli. Závislost je také dána rozložením fotoreceptorů na sítnici. Pokud se pozorovaný objekt nachází v zorném poli vymezeném pozorovacím úhlem 1°, obraz dopadá na sítnici pouze do její foveální části a tím jsou i při jasech odpovídajících mezopickému vidění vyřazeny tyčinky z procesu zpracování obrazu, protože se ve foveální části sítnice nenacházejí. Pro mezopické vidění je typická aplikace v mnoha prostředích, jako je například silniční a letecká doprava, nouzové osvětlení či osvětlení pro snížení rizika kriminálního deliktu a potlačení pocitů nebezpečí. [4], [12]

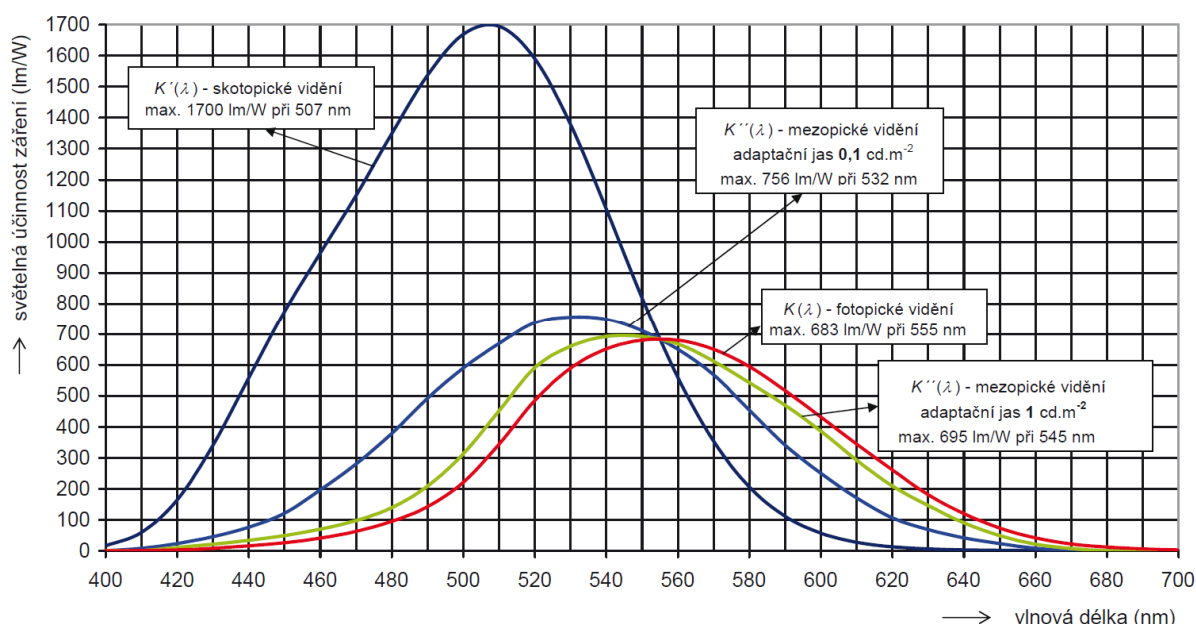
1.2 Problematika mezopického vidění

1.2.1 Adaptační hladiny mezopického vidění

Jak již bylo naznačeno výše, mezopické vidění je oblast adaptace na jasy v řádu tisíců až jednotek cd/m², se kterými se setkáváme nejčastěji v podobě adaptací na noční osvětlenou vozovku, parkoviště, chodník či v aplikacích nouzového osvětlení a dalších.

Je to adaptační stav, kdy čípkami ještě mají dostatečnou citlivost k tomu, aby zpracovávaly barevný obraz, a tyčinky poskytující monochromatické vidění ještě nejsou na nejvyšší hladině své citlivosti a také se účastní vidění. Výsledná křivka je ovlivněna vlastnostmi obou druhů fotoreceptorů. Míra citlivosti na světelný podnět v podmínkách mezopického vidění v rozsahu jasů asi 1:1000 vede k potřebě definovat průběh citlivosti zvlášť pro každý adaptační jas,

neboť měnící se citlivosti fotoreceptorů v tak širokém rozsahu zásadně ovlivňuje spektrální průběh vnímání, jak je vyobrazeno na obr. 12.



Obr. 12 Křivky spektrální citlivosti zraku [16]

Křivky citlivostí pro jednotlivé druhy vidění mají společný bod na vlnové délce 555 nm. Na této vlnové délce mají všechny hladiny adaptací shodnou spektrální citlivost 683 lm/W. To můžeme tvrdit na základě platnosti rovností světelných účinností skotopického a fotopického vidění právě na vlnové délce $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ a předpokladu, že mezopické vidění je v zásadě kombinací předchozích dvou. [15]

1.2.2 Doporučený matematický zápis výpočtu mezopického vidění

Pro jednoduchý matematický popis spektrálního průběhu mezopické křivky jako jednoduchou lineární kombinaci fotopického a skotopického vidění doporučuje mezinárodní komise pro osvětlování CIE tyto vztahy:

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda) \quad \text{kde } 0 \leq m \leq 1 \quad (1.1)$$

a

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(\lambda)} \int V_{mes}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad (1.2)$$

kde

$M(m)$ je normalizovaná funkce upravující průběh maxima $V_{mes}(\lambda)$ poměrového do maximální hodnoty „1“

m je koeficient, který závisí na adaptačních podmínkách:

jestliže $L_{mes} \geq 5 \text{ cd/m}^2$, pak $m = 1$

jestliže $L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd/m}^2$, pak $m = 0$

$V(\lambda)$ je spektrální křivka fotopického vidění

$V'(\lambda)$ je spektrální křivka skotopického vidění

L_{mes} je mezopický jas

$L_e(\lambda)$ spektrální charakteristika v $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$

Uvedené rovnice poskytují základ k smysluplným výsledkům při sestavování rovnic průběhů charakteristik mezopického vidění. Odlišnost jednotlivých interpretací (sestavení) rovnic nazýváme „mezopické systémy“ a jsou popsány v této práci dále. Tyto systémy se pak liší v hodnotách součinitele m , který je upravován podle předem stanovených kritérií tak, aby vyhovoval filozofii a zaměření výzkumného záměru. [4]

1.2.3 Spektrální závislost mezopického vidění

Hladiny jednotlivých adaptačních osvětleností nejsou jedinou proměnnou upravující průběh křivky citlivosti. Respektive, ne jen rozdílné citlivosti čípků a tyčinek, ale i jejich polohy maxim ve smyslu osy vlnové délky hrají významnou roli.

Malým příkladem této závislosti budiž následující situace:

Pokud chceme na spektrální charakteristice fotopického vidění zjistit, jaká vlnová délka odpovídá zisku například 500 lm/W , stačí na grafu z obr. 12 vynést přímkou rovnoběžnou s horizontální osou a ve dvou bodech, kde přímka protíná charakteristiku což je vlevo i vpravo od maxima, spustit kolmici k této ose a odečíst vlnovou délku. Vzhledem k tomu, že fotopického vidění se účastní pouze čípků, jejich citlivost je na obou nalezených vlnových délkách stejná. Shodná situace nastává při příkladu se skotopickou citlivostní křivkou, kde opět dostáváme dvě stejné hodnoty pro jeden konkrétní zisk lm/W a to opět na levé i pravé části křivky od maxima. Zde opět figuruje pouze jeden typ fotosenzorů, jimiž jsou tyčinky.

U mezopického vidění bychom mohli předpokládat situaci podobnou. Uvedeme si stejný cíl, jako v předchozím příkladu. Požadujeme zjištění vlnových délek pro spektrální citlivost 500 lm/W a uvažujeme adaptační jas na hodnotě $0,1 \text{ cd/m}^2$. Pak v obou hodnotách, které získáme dle příslušné křivky na obr. 12, musíme brát na zřetel rozdílný poměr typů fotoreceptorů, které se na zpracování těchto dvou odlišných vlnových délek podílejí.

Na hodnotě větší vlnové délky, 577 nm při spektrální citlivosti 500 lm/W a definovaném jasu, se na vidění podílejí více čípký, nežli tyčinky. Křivka citlivosti fotopického vidění je zde ziskovější a čípký do výsledného světelného vjemu přispívají více. Avšak u druhé hodnoty 490 nm, která je odečtena při stejném jasu a spektrální citlivosti, se na vidění několikanásobně vícekrát podílejí tyčinky, nežli čípký. Světelný vjem je vzhledem k angažovanosti a citlivosti čípků v této oblasti subjektivně mnohem jasnější. Tento fakt je respektován poměrem účasti skotopického ku fotopickému vidění nazvaným *S/P ratio*.

1.2.4 Poměr S/P – S/P ratio

Různý poměr účasti čípků a tyčinek na vidění při jejich vzájemné součinnosti v podmínkách mezopického vidění je vyjádřen vztahem, který reprezentuje hodnotu spektrálně závislého zisku světelného podnětu pro jednotlivé typy vidění (fotopické a skotopické).

$$S/P\ ratio = \frac{K'_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (1.3)$$

kde

- K_m = 683 lm/W je maximální citlivost pro fotopické vidění $K(\lambda)$
- K'_m = 1700 lm/W je maximální citlivost pro skotopické vidění $K'(\lambda)$
- S_λ je spektrální charakteristika vyzařování adaptačního prostředí
- $V(\lambda)$ je spektrální křivka fotopického vidění
- $V'(\lambda)$ je spektrální křivka skotopického vidění
- λ je vlnová délka

Integrál v čitateli vzorce (3) můžeme jednoduše popsat jako vynásobení spektrální charakteristiky zdroje či adaptačního prostředí křivkou skotopického vidění. Větší vlnové délky jsou touto charakteristikou potlačeny a vyzařování na kratších vlnových délkách je zesíleno a to nejvíce v oblasti délek maxima pro skotopické vidění. Integrální počet ve jmenovateli je obdobou předchozího. Jako referenční je zde křivka fotopického vidění, která naopak zvýhodňuje delší vlnové délky, avšak ani v maximu svého průběhu jim nepřičítá takové zesílení, jako v případě předchozího.

Výsledek poměru skotopického k fotopickému vidění je vždy ve formě bezrozměrného čísla, které se pohybuje od hodnot menších než 1 pro světelné zdroje s rozložením vyzařovaného spektra převážně do oblasti delších vlnových délek, tedy v oblasti čípkového vidění, až do hodnot větších než 1 odpovídající zdrojům, jejichž významná část vyzařovaného spektra se nachází v oblastech kratších vlnových délek, kde je v mezopických adaptacích dominantní tyčinkové vidění.

Typově vybrané světelné zdroje seřazené dle hodnoty poměru S/P ratio tak, aby charakterizovaly jednotlivé skupiny nejpoužívanějších prostředků k osvětlování.

Tab. 1 Světelné zdroje a jejich S/P poměr

Světelný zdroj	S/P ratio[-]	Pozn.
Nízkotlaká sodíková výbojka – LPS	0,25	-
Vysokotlaká sodíková výbojka – HPS	0,40-0,76	-
Zářivka – teple bílá	0,98	2900 K
Inkadescentní zdroj	1,41	2850 K
Inkadescentní zdroj	1,54	4100 K
zářivka – studená bílá	1,58	5000 K, triphosphor
zářivka – studená bílá	1,70	5000 K, R_a 90
LED – neutrální bílá	1,68	4180 K
Zářivka – denní	1,72-2,22	-
Indukční výbojka	1,83	4866 K
LED – studená bílá	2.50	6000 K

Z tabulky můžeme vyčíst závislost velikosti výsledného poměru S/P ratio na náhradní teplotě chromatičnosti. To je dáno složením vlnových délek vyzařovaného spektra zdroje. Z hlediska dosažení vyšších efektivních vizuálních výkonů se zdá použití zdrojů s vysokým poměrem S/P jako ideální. Problematika teploty chromatičnosti a hladin osvětlení je nastíněna dále v bodě 3.

V reklamním světě výrobců se již takové úvahy a marketingové pohnutky ukazují, kdy je za pomoci poměru S/P vypočítán jakýsi vizuální výkon, avšak tyto propočty jsou častokrát zmanipulovány tak, aby výsledky jen nabádaly ke koupi konkrétních výrobků. Výpočtový vzorec, který je uváděn, je různorodou variací na myšlenku vynásobení fotopického osvětlení poměrem S/P za občasného přispění jakýchsi součinitelů. Výsledná hodnota pak nemá nic společného s objektivním údajem pro posouzení jednotlivých světelných zdrojů.

1.3 Mezopické systémy

Názvem „systém“ či „mezopický systém“ je definována procedura či matematické vyjádření popisující spektrální citlivost oka na světelné podněty v adaptačních jasech mezopického vidění. Tyto procedury vycházejí ze vztahů uvedených v rovnicích (1.1), (1.2) a (1.3). Popsané rovnice jsou pak dále dotvářeny a odvozovány. Výsledek je pak dán vstupními veličinami jasové adaptace a definovaném poměru spektrální odezvy vjemové soustavy ve fotopické a skotopické oblasti vnímání s tím, že k těmto poměrům v jednotlivých „systémech“ jsou přiřazeny koeficienty upravující výslednou hodnotu tak, aby odpovídala co nejvíce filozofii konkrétního výpočtového zaměření.

Všechny osvětlovací normy a stanoviska jsou založeny na dvou křivkách, respektive na jedné – fotopické $V(\lambda)$, která byla definována v roce 1924. Křivka skotopického vidění $V'(\lambda)$ definovaná v roce 1951 do praktické fotometrie nepronikla nijak zásadně. Po více než 70 letech výzkumu a pokusů mezinárodní komise pro osvětlování CIE uvádí doporučený výpočtový systém pro mezopické vidění. [3]

Předpokládá se, že jeho uvedení nebude mít vliv pouze na fotometrii jako takovou, ale vzhledem k rozmachu LED zdrojů se dá očekávat využití znalostí z fotometrie také pro samotnou výrobu a návrh těchto zdrojů, či jiných zdrojů s vysokým poměrem *S/P ratio*. Vzhledem k tomu, že současné prognostiky předpokládají venkovní a veřejné osvětlování pomocí bílých LED, dá se očekávat, že mezopická fotometrie bude mít vliv i na optimalizování osvětlovacích soustav nízkých hladin osvětlení. [3]

1.3.1 USP-system

Tento matematický popis mezopického vidění byl vydán jako první z uvedených systémů. Jeho autorem je He a spol., kteří jej publikovali v letech 1997 až 1998. K definování tohoto systému byla základem data získaná při experimentu s monokulárním pozorovatelem, kde byl měřen čas reakce pozorovatele. Ten tvořil pozorovaný předmět, k jehož iluminaci byla použita vysokotlaká sodíková výbojka a metal-halogenidová výbojka. Pozadí pozorovaného cíle bylo nasvíceno stejnými světelnými zdroji a kontrast mezi nimi byl $C = 2,3$. Počet pozorovatelů, kteří se zúčastnili měření, byl 2. USP-system definoval rozsah mezopického vidění v rozsahu $0,001 \text{ cd/m}^2$ do $0,6 \text{ cd/m}^2$. [4]

Tabulka ukazuje, jak se liší procentuálně vypočítaný mezopický jas pomocí USP oproti jasu, který bychom odečetli z klasického jasoměru s fotopickým spektrálním filtrem respektujícím křivku citlivosti lidského oka.

Tab. 2 Mezopický jas v procentech fotopického jasu pro systém USP [4]

	<i>S/P ratio</i>	Fotopický jas [cd/m^2]					Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	
LPS ~	0,25	-75	-73	-65	-34	0	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-54	-62	-44	-21	0	
HPS ~	0,65	-34	-32	-26	-12	0	
	0,85	-15	-14	-11	-5	0	
MH teple bílá ~	1,05	5	4	3	1	0	
	1,25	24	22	16	7	0	
	1,45	43	38	27	11	0	
	1,65	61	54	37	15	0	
	1,85	79	69	47	18	0	
MH denní světlo ~	2,05	97	84	56	22	0	
	2,25	115	98	65	25	0	
	2,45	132	112	73	27	0	
	2,65	149	122	80	30	0	

1.3.2 MOVE-System

Na vzniku systému MOVE se podílelo několik evropských vysokých škol ve společné kooperaci. Základní vizí při tvorbě tohoto systému nebyl přesný a detailní popis mezopického vidění, ale vytvoření popisu modelových situací nastávajících při řízení automobilu během noci tak, aby výsledná práce byla co nejlépe propojitelná s praxí, ke které se ve svých základech přímo odvolává. [4]

Pokud chtěli tvůrci respektovat konkrétní praktické podmínky, museli si prvně položit základní otázky, které následně definovali postup prací. Noční řízení vozu lze tedy charakterizovat trojicí základních otázek:

Je to vidět? Jak rychle? Co to je?

První otázka „*Je to vidět?*“ koresponduje se základní podstatou prahového kontrastu objektu, který je třeba splnit, aby člověk (řidič), měl možnost rozeznat objekt ve svém zorném poli. Pro zkoumání tohoto typu podnětu je tedy zvolena metoda prahového kontrastu. [29]

Druhou otázkou „*jak rychle?*“ odpovídáme testovací metodou reakčního času na podnět. Svůj základ v reálných podmínkách pak tato otázka má v předpokladu, že reakční doba řidiče hraje důležitou roli pro bezpečnost provozu. [29]

Třetí otázka „*Co to je?*“ je odvozena od potřeby konkrétního rozeznání detailů, které vede ke konkrétním rozhodnutím řidiče. Takováto situace je pak v laboratořích simulována úlohou rozeznání a identifikace pozorovaného objektu za konkrétních podmínek. [29]

Všechny popisované otázky mají návaznost na jednotlivé laboratorní měření, kterých se zúčastnilo dohromady 109 pozorovatelů. Systém MOVE definuje podmínky mezopického vidění od $0,01 \text{ cd/m}^2$ do hodnoty 10 cd/m^2 . [4]

Tab. 3 Mezopický jas v procentech fotopického jasu pro systém MOVE [4]

	<i>S/P ratio</i>	Fotopický jas [cd/m^2]									Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	2	3	5	10	
LPS ~	0,25	-75	-75	-36	-22	-13	-8	-6	-4	-1	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-55	-42	-25	-16	-9	-6	-5	-3	-1	
HPS ~	0,65	-35	-24	-15	-10	-6	-4	-3	-2	0	
	0,85	-15	-10	-6	-4	-2	-2	-1	-1	0	
MH teple bílá ~	1,05	5	3	2	1	1	1	0	0	0	
	1,25	22	15	10	7	7	3	2	1	0	
	1,45	38	26	17	12	12	5	3	2	1	
	1,65	52	36	24	16	16	7	5	3	1	
	1,85	66	46	31	21	21	9	6	4	1	
MH denní světlo ~	2,05	79	56	38	26	26	12	8	5	1	
	2,25	92	65	44	30	30	12	9	6	1	
	2,45	105	74	51	34	34	14	11	7	2	
	2,65	116	83	57	39	39	16	12	7	2	

1.3.3 Intermediate Systém – MES1 a MES2

Mezinárodní komise pro osvětlování uvádí v technické zprávě CIE 191:2010 dva systémy s označením MES1 a MES2 věnující se výpočtu mezopických jasů. Jejich úkolem je předejít nectnostem systémů USP a MOVE. Mezi tyto nectnosti má patřit například příliš jednoduché matematické uspořádání USP systému, který tak neposkytuje věrná data, která by respektovala skutečné podmínky. Systému MOVE je pak vytýkána jednostranná zaměřenost pouze na úkony spojené s řízením vozu v nočních adaptačních podmínkách.

Zmiňovány jsou také, jako nevhodné u systémů USP a MOVE, jejich maximální adaptační jasy. V jednom případě příliš nízká hodnota $0,6 \text{ cd/m}^2$ (USP), v druhém příliš vysoká hodnota 10 cd/m^2 (MOVE). MES1 má maximální hodnotu adaptačního jasu mezopického vidění 3 cd/m^2 s tím, že již na této hodnotě vnímaný mezopický jas odpovídá jasu fotopickému.

MES2 je pak definován až do hodnoty 5 cd/m², kde již také nemá odchylku od jasů vnímaného fotopicky.

Tab. 4 Mezopický jas v procentech fotopického jasů pro systém MES1 [4]

	<i>S/P ratio</i>	Fotopický jas [cd/m ²]							Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	2	3	
LPS ~	0,25	-75	-75	-34	-18	-7	-2	0	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-55	-44	-23	-13	-5	-2	0	
HPS ~	0,65	-35	-25	-14	-8	-3	-1	0	
	0,85	-15	-10	-6	-3	-1	0	0	
MH teple bílá ~	1,05	5	3	2	1	0	0	0	
	1,25	23	15	9	5	2	1	0	
	1,45	39	26	16	9	4	1	0	
	1,65	54	36	22	13	5	2	0	
	1,85	68	46	28	17	7	2	0	
MH denní světlo ~	2,05	82	55	34	20	8	3	0	
	2,25	94	64	40	24	10	3	0	
	2,45	107	72	45	27	11	4	0	
	2,65	119	81	51	30	13	4	0	

Tab. 5 Mezopický jas v procentech fotopického jasů pro systém MES2 [4]

	<i>S/P ratio</i>	Fotopický jas [cd/m ²]								Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	2	3	5	
LPS ~	0,25	-75	-52	-29	-18	-9	-5	-2	0	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-55	-34	-21	-13	-6	-3	-2	0	
HPS ~	0,65	-31	-20	-13	-8	-4	-2	-1	0	
	0,85	-12	-8	-5	-3	-2	-1	0	0	
MH teple bílá ~	1,05	4	3	2	1	1	0	0	0	
	1,25	18	13	8	5	3	1	1	0	
	1,45	32	22	15	9	5	3	1	0	
	1,65	45	32	21	13	7	4	2	0	
	1,85	57	40	27	17	9	5	3	0	
MH denní světlo ~	2,05	69	49	32	21	11	6	3	0	
	2,25	80	57	38	24	12	7	4	0	
	2,45	91	65	43	28	14	8	4	0	
	2,65	101	73	49	31	16	9	5	0	

1.3.4 Doporučený mezopický systém

Komise CIE uvádí v technické zprávě CIE 191:2010 jako doporučený mezopický systém založený na vizuálních zkouškách systém **MES2**. [4]

Cílem CIE je nyní zavést tento systém do praxe, což znamená definovat postupy pro navrhování osvětlení konkrétních oblastí jako je venkovní osvětlení, veřejné osvětlení silniční, pro pěší zóny, městské oblasti, nouzové osvětlení a mnohé jiné. Je také třeba definovat kritéria, která budou respektovat zorný úhel, neboť stále není vyřešena otázka foveálního a periferního vidění v podmínkách mezopických jasů. [3]

1.4 Mezopická fotometrie

1.4.1 Návrh přístroje pro určování mezopických jasů a osvětleností

Pokud bychom chtěli mít spektrální filtr, který po nasazení na jasoměr či luxmetr bude na své stupnici ukazovat hodnoty mezopického vidění, museli bychom vzhledem k různým adaptačním jasům mít pro každý takový jas filtr navržený zvlášť s tím, že ke každému adaptačnímu jasů bude náležet ještě sada filtrů pro různé spektrální charakteristiky jednotlivých světelných zdrojů.

Jistým řešením problematiky mezopické fotometrie mohou být moderní spektrofotometry, které kromě spektra mohou zaznamenat údaj o jasů či osvětlenosti (samozřejmě ve fotopických hodnotách). Pak můžeme relativně jednoduše po vyhodnocení spektrálních dat a určení poměru S/P vyčíslit procentuální změnu odměřených fotopických veličin dle tabulek pro vybraný mezopický systém a získat tím údaj mezopické veličiny.

Budoucnost mezopické fotometrie tedy zřejmě nespočívá v mezopických filtrech, které by doplňovaly současné přístroje, ale v samostatně programovatelných přístrojích schopných zpracovat měřené spektrum a následně dle předem definovaných parametrů vyhodnotit fotopické veličiny jako mezopické.

2 Historie světelných zdrojů se zaměřením na LED

2.1 Historie světelných zdrojů

Obecná zásada pro uvažování a stanovování pravidel či veličin světelné techniky vychází z přirozené adaptace lidského oka na sluneční světlo a jeho reakcí na něj. Proto i zpracování historie světelných zdrojů začíná u samotného slunce, které bylo u zrodu a prvotních adaptací smyslového vjemu zraku živočichů.

- **cca 4 biliony let př. n. l. – Slunce**

- Slunce chápeme (i z hlediska přirozeného vývoje orgánu zraku) jako referenční světelný zdroj pro mnoho definic světelně technických veličin. Spektrum viditelného záření vyzařované sluncem má velmi podobný průběh charakteristiky, jako lidský zrak s tím, že spektrální vyzařování slunce pokračuje dále do oblasti infračerveného záření. [41]

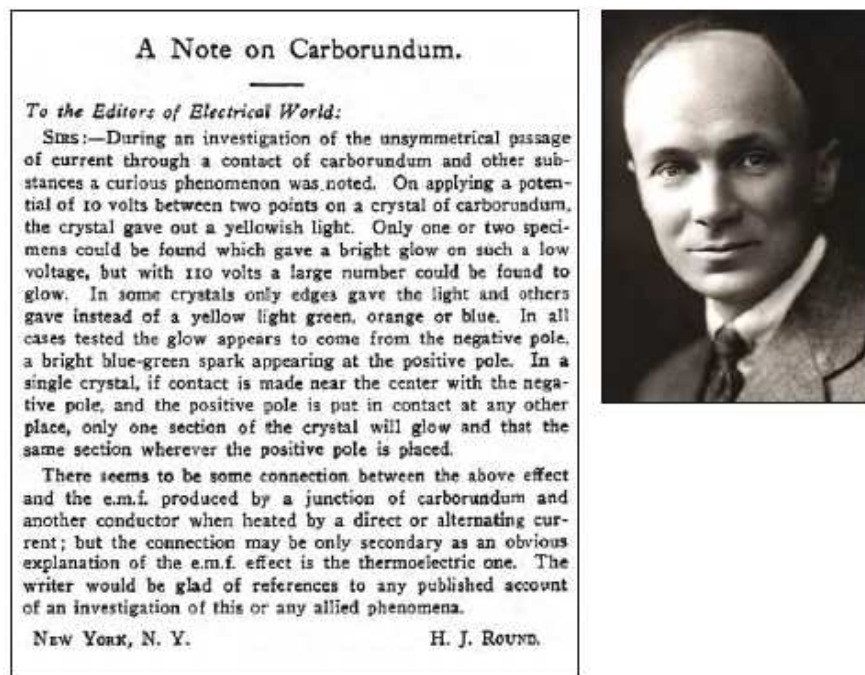
- **400 000 let př. n. l. – Oheň**

- Oheň zřejmě získával Homo erectus pouze náhodou, když blesk zapálil například strom. Táborový oheň byl zřejmě prvním umělým osvětlením, které kdy člověk použil. Prvotní pochodně pak byly prvními přenosnými svítilnami. [51]
- **Cca 13 000 let př. n. l.** – Dá se předpokládat využití ohně hořícího nejen díky dřevu, ale v této době mohli lidé začít využívat také jako palivo živočišné a rostlinné tuky. [51]
- **5000 př. n. l.** – Objevují se zvířecí svítilny. Tučné ryby a ptáci se využívali jako zdroj paliva pro hoření ohně. Za zvířecí svítilny můžeme také považovat využití světlušek pro potřeby osvětlování, a to nejčastěji chodeb, kde iluminace pomocí tohoto světelného zdroje byla dostatečná. Záznamy o těchto způsobech lze nalézt například v Japonsku. [51]
- **5000 př. n. l.** – V tomto období také nalézáme první zmínky o využívání olejových lamp v různých úpravách. [51]
- **cca 400 n. l.** – Původní svíčky byly vyrobeny z včelího vosku, což vedlo k vysoké ceně těchto světelných zdrojů. Jejich užití bylo tedy velmi omezené. Rozmach svíček pro běžnější použití nastává o více než jedno milénium později ve 14 století. [51]

- **1792 – Plynové osvětlení**
 - První popsany způsob získání plynu užitého k hoření plamene byl dokumentován Williamem Murdockem, který tento plyn získával zahříváním uhlí. A 28. ledna 1807 bylo v Londýně prvně demonstrováno veřejné plynové osvětlení. [51], [47]
- **1809 – Elektrický oblouk**
 - Sir Humphrey Davy demonstroval elektrický oblouk, který měl sloužit pro účely osvětlování. Pro vytvoření tohoto oblouku použil elektrody z lisovaného dřevěného uhlí a energie byla dodána z 2000 baterií.
 - Rozšíření obloukových lamp přišlo až s jejich modernizací a především vynálezem generátoru v roce 1860, který umožnil opustit systém baterií. [51], [46]
- **1874 – První elektrický inkadescenční zdroj [51]**
 - **1879** – Edisonova žárovka
 - **1907** – Žárovka s wolframovým vláknem
 - **1913** – Žárovky plněné plynem
 - **1960** – Halogenové žárovky
- **1901 – Vysokotlaká rtuťová výbojka [51]**
 - **1901** – Vysokotlaká rtuťová výbojka
 - **1932** – Nízkotlaká sodíková výbojka
 - **1960** – Halogenidová výbojka
 - **1966** – Vysokotlaká sodíková výbojka
 - **1994** – Sirná výbojka
- **1937 – Zářivkové svítidlo**
 - Záření vzniká na luminoforu, který přeměňuje UV záření zdroje vzniklé výbojem v plynu mezi elektrodami na viditelné světlo pro lidské oko.
- **1960 – Laser**
- **1890s – 1990 Indukční výbojka**
 - Jedná se o zdroj světla, kde se transformuje UV záření, vzniklé výbojem v bezelektrodevém výbojovém prostoru pomocí indukce, luminoforem na viditelné světlo.

2.2 Historie zdrojů LED – světlo emitujících diod

- **1907** – Henry Joseph Round objevil anorganickou substanci, která při průchodu proudem emitovala světlo.



Obr. 13 Publikace H. J. Rounda o jeho objevu s fotografií

Round ve svém článku popisuje, že po přiložení napětí (10 V – 100 V) vzniká mezi elektrodami a karbidem křemíku viditelná emise světla různé barvy – to v závislosti na konkrétním užitém krystalu. Z popisu můžeme odvodit, že se nejednalo o zdroj světla na bázi PN přechodu. Round světlo emitoval na přípravku spíše připomínajícím Schottkyho diodu. [33]

- **1921** – Oleg Vladimirovich Losev znovu pozoruje jev luminiscence na polovodičích používaných místo elektronek sloužících jako usměrňovače v rádiových obvodech. Tyto polovodiče byly na bázi polovodič-kov. Losev si zprvu nebyl jist tím, co způsobuje vznik světla na těchto substrátech a tak zkoumal rychlost odpařování kapičky benzenu při emisi světla. Kapička se však odpařovala pomalu a tak Losev vyloučil vznik záření inkadescencí. Také předpokládal spojitost s Einsteinovými teoriemi a tak studuje tento jev dál s tím, že vyslovuje myšlenku o možnostech technické revoluce pomocí optické komunikace. [23], [33], [52]
- **1935** – Francouzský fyzik George Destriau pokračuje v popisu elektroluminiscence.

- **1951** – Vývoj tranzistorové techniky vede k pokroku výroby polovodičů. Emise světla se tak nyní může začít naplno rozvíjet. V roce 1959 tak přichází ke slovu galium-arsenid (GaAs) a galium-fosfor (GaP). Tyto sloučeniny emitovaly infračervené spektrum. Diod s tímto polovodičovým základem se dodnes používá například v dálkových ovladačích. [23]
- **1962** – Dalším krokem bylo dosáhnout viditelného spektra za pomoci dopování základního materiálu. Uvažovalo se nad možnostmi GaAsP a AlGaAs. Technologie výroby takového sloučeniny představovala problém. V tento čas velmi přispěli vědci ze společnosti IBM, kteří navrhli technologii schopnou takovou sloučeninu získat. Následně se fosfid galitý stal hlavní sloučeninou pro výrobu jasně červeně světloemitující diody. [23], [10]

Koncem šedesátých let je vyrobena první modrá světloemitující dioda na bázi SiC. Měla však velmi nízkou účinnost převodu elektrické energie na světelnou (zhruba 0,005 %). Její zdokonalení a komerční výroba přišla až v devadesátých letech, kdy se od báze SiC upustilo a byla nahrazena polovodiči ze III-V skupiny periodické tabulky prvků. [33]

- **1971** – Přicházejí i další barvy, jako jsou zelená, oranžová, žlutá. Stejně tak je patrný pokrok ve výkonu a efektivitě. [23]
- **Během 80. let a začátku 90.** přichází na trh nitrid galitý (GaN), který umožňoval výrobu barev od tónů zelené až po ultrafialovou. Výroba substrátu GaN je však datována už do let 1969-1974. [23], [33]
- **1993** – Shuji Nakamura v Japonsku vynalézá první komerčně úspěšný model zářivě modré LED. Tato modrá LED (470 nm) má již účinnost převodu elektrické energie na optickou 0,03 %. Později Nakamura také představuje efektivní zelenou LED na bázi indium-galium-nitridu (InGaN). [23], [33]
- **1995** – První bílá LED s luminoforem. Jde o filozofii bílého světla, kdy na LED vyzařující v pásmu modrého spektra nanese vrstvu žlutého luminoforu, který pohlcuje část modrého záření a přemění jej na záření žluté barvy. Takto dostáváme dvě doplňkové barvy (žlutá a modrá), které společným mícháním vidí oko jako bílé světlo. O dva roky později od prvního uvedení bílé LED s luminoforem se dostává tento model i na komerční sféru.
- **2006** – ohlášena LED s hodnotou 100 lm/W. V této době jim konkurují již jen světelné zdroje na bázi hoření výboje v plynu. [23]
- **2010** – 3. února ohlásila společnost Cree, že laboratorně dosáhla u LED měrného výkonu 208 lm/W. Tato hodnota byla dosažena při proudu 350 mA, náhradní teplotě

chromatičnosti 4579 K a pokojové teplotě okolí. Předpokládá se, že LED o takovém měrném výkonu by se na komerční sféru mohla dostat o 2 až 3 roky později. [5]

- **2011** – V prvním a druhém kvartálu roku 2011 se nejvyšší měrné výkony komerčně dostupných LED (firmy Cree, Nichia) pohybují v mezích 130 – 140 lm/W při proudu 350 mA a barvě světla – chladně bílá. [27]

2.3 Odhad vývoje v budoucnosti

Vývoj technologie LED zažívá svůj největší rozmach v posledních letech. Mluví se o něm jako o zdroji budoucnosti. Ministerstvo energetiky v USA (DOE) vydává každoročně své prognostiky s vývojovými trendy v oblasti světelných zdrojů. Ve zprávě na jaře roku 2011 však přišla překvapivá informace, kdy odhady dosažitelných maximálních výkonů a odhady teoretických maxim byly sníženy. Letmý náhled na současné prognostiky poskytuje tab. 6.

Tab. 6 Predikce dosažitelného měrného výkonu LED v následujících letech [35]

	Rok		
	2012	2015	2020
Chladně bílá LED η [lm/W]	166	197	215
Teple bílá LED η [lm/W]	133	179	211

S odhadem dosažitelných hodnot jde také otázka, kdy mohou být zdroje s takovými to parametry na trhu v komerční sféře. Současná praxe je taková, že přechod z laboratoře do sériové výroby a používání nových LED modulů ve svítidlech trvá přibližně 2 roky. To přináší teoretickou vizi pro rok 2017, kdy budou již na trhu svítidla s LED moduly dosahujícími téměř 200 lm/W s tím, že svítidla, která budou následovat v dalších letech, již nepřinesou žádnou skokovou změnu měrného výkonu. Jejich měrné výkony by se měly teoreticky lišit jen v řádu procent.

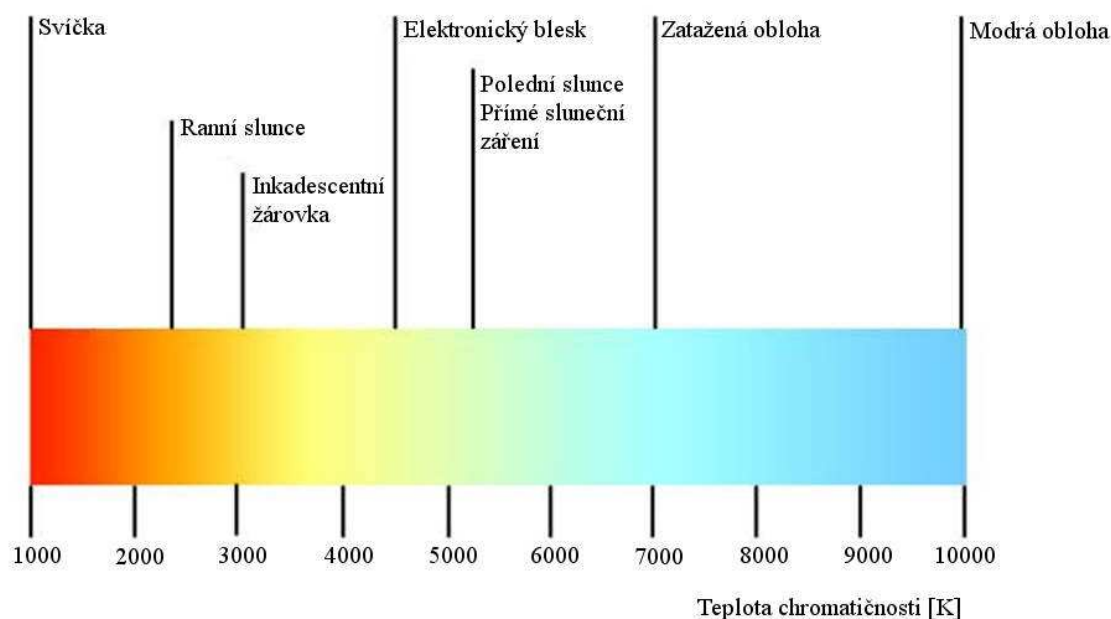
3 Volba barvy LED v souvislosti s teplotou chromatičnosti a měrnými výkony

3.1 Vlastnosti barvy světla

3.1.1 Teplota chromatičnosti

Pojem teplota chromatičnosti T_c se používá k popisu barvy světla ve smyslu připodobnění posuzovaného zdroje k ekvivalentnímu černému (Planckově) zářiči, kde spektrální složení záření těchto zdrojů si je navzájem velmi blízké. Teplota chromatičnosti tedy uvádí teplotu černého zářiče v kelvinech, při které je emitováno stejné či podobné světelné spektrum, jako posuzovaného zdroje. Existuje také popis T_c udávaný v miredech s jednotkou MK^{-1} . Jde o převrácenou hodnotu T_c v kelvinech, vynásobenou číslem 10^6 .

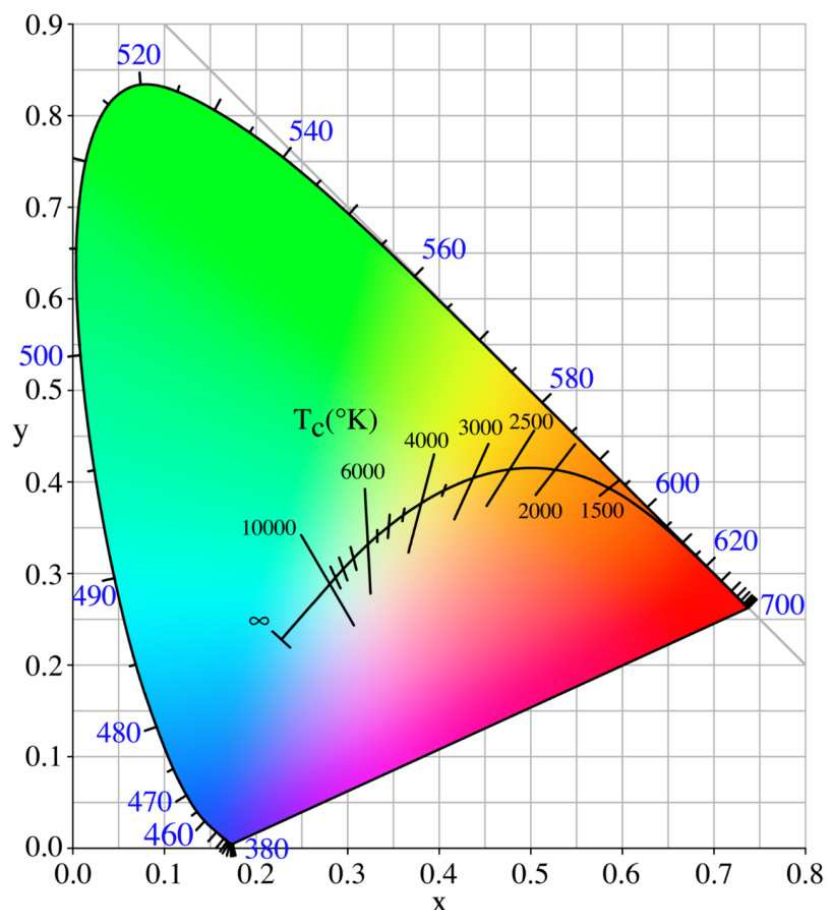
V přirozeném prostředí země se setkáme s rozsahem těchto teplot od 1800 stupňů K u plamene svíčky až po 28000 stupňů K u noční oblohy v Norsku. [11] Pro praktické využití však plně dostačuje průběh těchto teplot od 2000 K po 10000 K. Typické příklady zdrojů reprezentující různé T_c společně s barevným popisem vyzařovaného světla jsou na obr. 14.



Obr. 14 Diagram barvy teploty chromatičnosti s příkladem typických zdrojů [31]

Jak ukazuje obr. 14, teplota chromatičnosti roste od teplých barev, jejichž spektrum tvoří převážně dlouhé vlnové délky, do barvy světla studených barev charakterizovaných kratšími

vlnovými délkami. Celé toto barevné spektrum je definováno v kolorimetrickém trojúhelníku tak zvanou čárou teplotních zdrojů na obr. 15.



Obr. 15 Kolorimetrický trojúhelník s vyznačenou čárou teplotních zdrojů [48]

V kolorimetrickém trojúhelníku, který je na obr. CXC je čára teplotních zdrojů ve stupních K. Pokud by byla přepočítána na miredy, pak by jednotlivé rozestupy naznačených hodnot měli mezi sebou konstantní vzdálenosti.

U výbojových zdrojů je situace mírně komplikovanější. Spektrální průběh těchto zdrojů není natolik souvislý, a častokrát je soustředěn jen v určitých oblastech vlnové délky, na kterých zdroj vyzařuje. Průběh spektra se pak nepochybně neliší od spektra černého zářiče, ale barva světla se může shodovat. Pro takové situace je zaveden pojem náhradní teplota chromatičnosti. Její stanovení usnadňují zavedené čáry konstantní teploty chromatičnosti, které jsou znázorněny v kolorimetrickém trojúhelníku na čáře teplotních zdrojů jako úsečky tuto čáru protínající a v tomto zobrazení jsou na obr. 15 definovány například pro teplotu chromatičnosti 2000 K, 2500 K, 3000 K atd.

Stupně T_c dělíme do tří základních kategorií. Orientační hodnoty zatřídění těchto kategorií jsou následující:

Teple bílá	Warm White	$< \sim 3300 \text{ K}$
Neutrální (denní) bílá	Neutral White	$3300\text{-}5000 \text{ K}$
Chladně bílá	Cool White	$> \sim 5000 \text{ K}$

Světelné zdroje mohou mít stejnou teplotu chromatičnosti, avšak podání barev se může značně lišit. Takovou vlastnost světla, respektive světelného zdroje nazýváme index podání barev. Označení tohoto indexu je R_a .

3.1.2 Index podání barev R_a

V období dvou desetiletí od roku 1960 vychází Systém popisu podání barev. Mezinárodní komise pro osvětlování CIE navrhla 8 pastelových barev, které jsou osvětlovány referenčním zdrojem k němuž je vztažen zdroj posuzovaný. Průměrné rozdíly ve výsledku podání barev jsou pak průměrem odečítány od hodnoty 100. Takovou hodnotu podání barev má například denní bílé světlo. Naopak nízkotlaká sodíková výbojka vyzařující na velmi úzkém spektru vlnových délek má podání barev 0, neboť při osvětlení předmětů světlem z ní emitovaným nelze rozlišit jednotlivé barvy předmětů. R_a je bezrozměrnou veličinou. Změna podání barev je graficky naznačena na obr. 16.



Obr. 16 Změna podání barev při různém R_a [25]

Při snižujícím se indexu R_a , se vnímané barvy stávají méně „skutečnými“. R_a je tedy vyjádřením schopnosti věrného zobrazení barev.

Zajímavostí je, že žárovka ($T_c = 2700 \text{ K}$) i obloha severských zemí během dne ($T_c = 7500 \text{ K}$) mají $R_a = 100$ a přitom jejich podání barev je poměrně odlišné. U svíčky je slabé podání tmavě modré barvy, jako je slabé podání červených tónů pod denním severským

nebem. Teoreticky je tedy možné dle R_a srovnávat pouze zdroje, se stejnou hodnotou T_c . I tak je však index R_a velmi prospěšným a používaným pro stanovení podání kvality barev. [11]

Vyšší podání barev, kdy je $R_a > 60$, je ve Velké Británii dle norem dostatečný důvod pro snížení hladin osvětleností o jeden stupeň v obytných zónách, cyklostezkách a stezkách pro pěší, kde minimální udržovaná horizontální intenzita osvětlení je dána stupněm kriminality v dané lokaci. I přesto, že norma povolující tuto úpravu je již v platnosti, vedou se stále diskuse, zda je takováto světelná úprava regulérní. [30]

3.2 Měrný výkon a volba teploty chromatičnosti

3.2.1 Měrný výkon

Pro vyjádření schopnosti světelného zdroje emitovat viditelné světlo respektující zrakové možnosti vidění, je zaveden pojem měrného výkonu. Ten udává, kolik světla, respektive světelného toku jakožto výkonu světelného zdroje, je získáno z jeho příkonu. Výsledná hodnota výpočtového vztahu (3.1) měrného výkonu je v jednotkách lm/W.

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (3.1)$$

Teoretické maximum měrného výkonu pro fotopické vidění je 683 lm/W. Přibližné měrné výkony současných světelných zdrojů jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Měrné výkony světelných zdrojů [34]

Druh světelného zdroje	Měrný výkon η	Příkon
	[lm/W]	[W]
Obyčejná žárovka CLASSIC čirá	6 – 15	15 – 200
Halogenová žárovka 12V STANDARD	14 – 18	10 – 50
Kompaktní zářivka	48 – 63	5 – 30
Lineární zářivka T8 STANDARD	65 – 90	10 – 58
Lineární zářivka T5	67 – 104	24 – 80
Rtuťová výbojka	36 – 57	50 – 1000
Vysokotlaká sodíková výbojka	88 – 130	50 – 1000
Halogenidová výbojka s křemenným hořákem	78 – 100	70 – 2000
Halogenidová výbojka s keramickým hořákem	94 – 103	35 – 250
Nízkotlaká sodíková výbojka	100 – 178	18 – 180

U zdrojů LED je třeba při hodnocení parametru měrného výkonu mít namysli několik věcí:

- Udávaný měrný výkon LED zdrojů je platný pro malé příkony pohybující se v rozmezí 0,5 W až 3 W. Při vyšším příkonu měrný výkon LED zdroje klesá. Například u modelů určených především k venkovnímu osvětlování se příkon pohybuje okolo 10 W a měrný výkon je 100 lm/W.
- Míra měrného výkonu také závisí na teplotě chromatičnosti zdroje. To je dáno technickými a technologickými předpoklady při výrobě. LED s chladnějším světlem neboli vyšší teplotou chromatičnosti, poskytují větší světelný tok a tím také vyšší měrný výkon.
- Barevné podání zdrojů LED dosahuje hodnoty 90 a více. Takové podání barev však poskytují pouze zdroje s menším měrným výkonem. V současné době tedy vlivem technologie a postupu výroby jsou LED s vysokým měrným výkonem poskytovateli indexu barevného podání menšího než 80.

Pro ilustraci výše uvedených závislostí jsou v tab. 8 a 9 uvedeny dva LED zdroje firmy Cree určené pro osvětlování venkovních prostor s uvedením nejvyšších dosažitelných měrných výkonů a indexu podání barev při konkrétním rozsahu teplot chromatičnosti.

Tab. 8 LED zdroje řady XLamp® XM-L [5]

Cree® XLamp® XM-L LEDs		
T_c	Měrný výkon η	R_a
[-]	[lm/W]	[-]
Chladně bílá	138	65
Neutrální bílá	128	75
Teple bílá	108	80

Tab. 9 LED zdroje řady XLamp® XP-G [5]

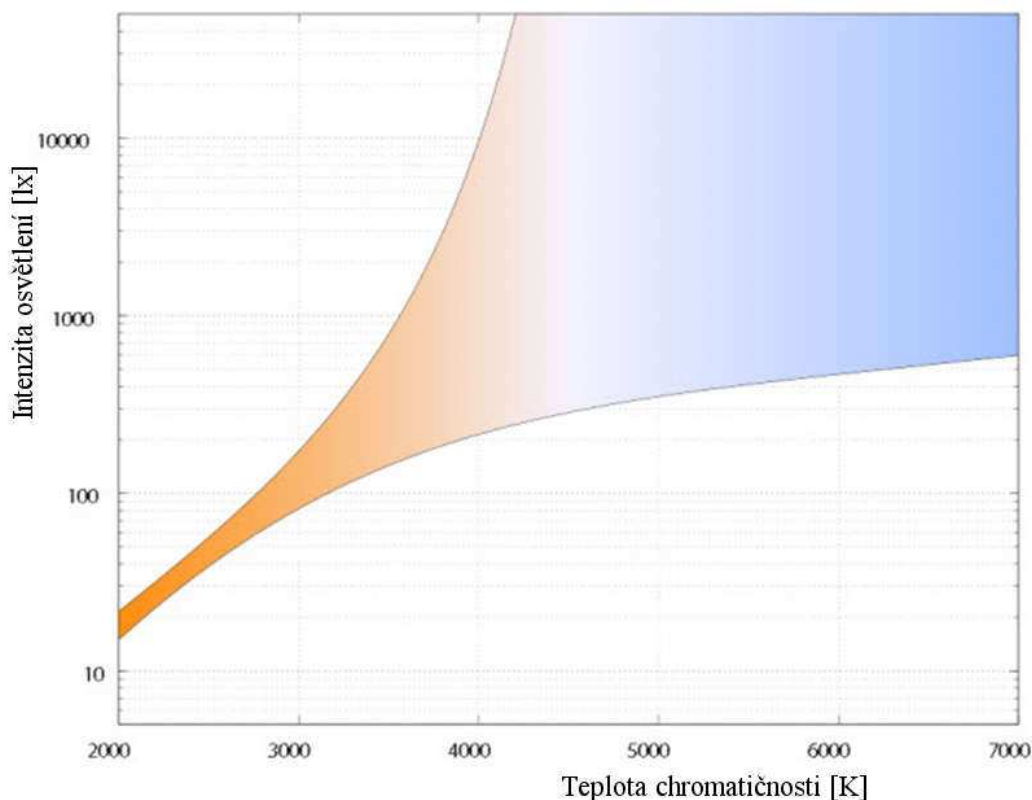
Cree® XLamp® XP-G LEDs		
T_c	Měrný výkon η	R_a
[-]	[lm/W]	[-]
Chladně bílá	132	75
Neutrální bílá	116	75
Teple bílá	102	80
90-CRI White	82	≥ 90

Pokud je požadováno velmi dobré podání barev, pak je třeba vědět, že daní je menší měrný výkon. U uvedeného zdroje LED XLamp® XP-G je měrný výkon modelu 90-CRI, který

má index barevného podání větší než 90, oproti nejvyšší hodnotě měrného výkonu zdroje z této řady téměř poloviční.

3.2.2 Kruithofův diagram

Na začátku 40. let 20. století se výzkumný pracovník firmy Philips, který se jmenoval Arie Andries Kruithof, věnoval výzkumu závislosti barvy světla ve smyslu teploty chromatičnosti na lidské subjektivní míře příjemných pocitů z osvětlení. Během svého výzkumu popsal, vztah mezi intenzitou osvětlenosti a teplotou chromatičnosti zdroje, který tuto osvětlenost způsobil. Kruithofův diagram je zobrazen na obr. 17.



Obr. 17 Kruithofův diagram [17]

Preference žlutého světla při nižších osvětlenostech je dána dlouhodobým vývojem člověka na zemi. Nízké hladiny osvětleností se totiž vyskytují v přirozených podmínkách například večer při soumraku či v noci u ohně, který člověka, jakožto jediný zdroj energie a světla, provázel dlouhou dobu. Vyšší osvětlenosti jsou pak na diagramu spjaty s vyššími teplotami chromatičnosti zdroje. Tento jev je také dán přirozeným vývojem, kdy během dne jsou osvětlenosti vysoké a slunce na obloze má vysokou teplotu chromatičnosti.

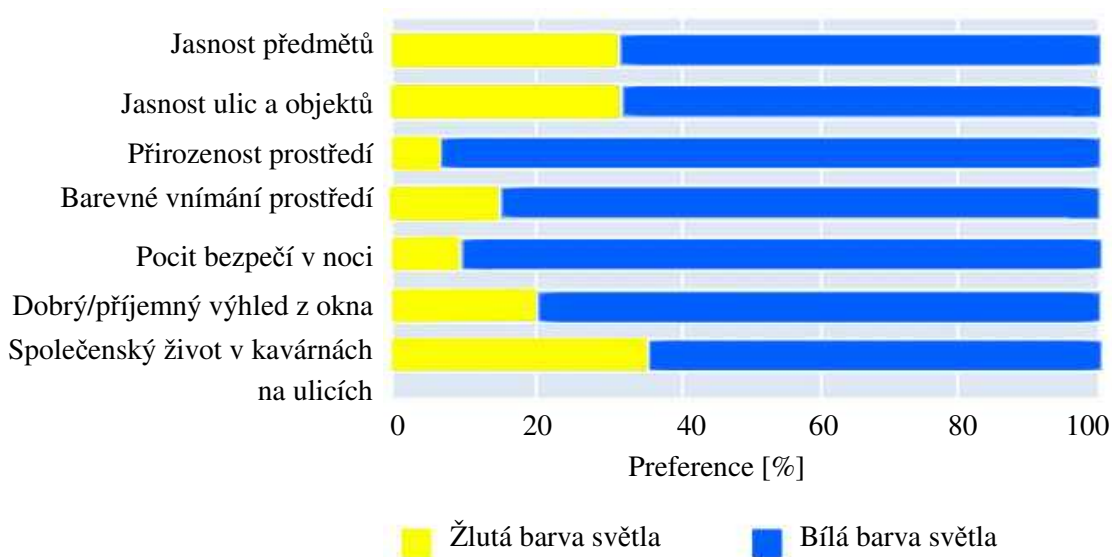
Dalším zajímavým zjištěním také je, že lidé z teplých až tropických podnebí podvědomě volí světelné zdroje s vyšší teplotou chromatičnosti oproti lidem ze studených podnebí, kde si lidé dopřávají světlo v barvě teple bílé, neboli s nižší teplotou chromatičnosti. Tento fakt podporuje teorii Kruithofova diagramu, ale také ji zároveň doplňuje v tom, že každý člověk, jakožto jedinec, má osobité vnímání a Kruithofův diagram tak není 100 % pomůckou platící na všechny stejně.

3.2.3 Vjem barvy světla při konstantní osvětlenosti

Na přelomu let 2006 a 2007 byl v New Yorském centru LRC pro výzkum osvětlení proveden hodnotící test vnímání dvou světelných zdrojů emitujících tzv. bílé a žluté světlo.

Emitentem žlutého světla byla vysokotlaká sodíková výbojka při předpokládaném indexu podání barev cca 20 a teplotě chromatičnosti do 2000 K. Druhým zdrojem, který byl určen pro emisi bílého světla, byla halogenidová výbojka Philips MASTER CosmoWhite, jejíž řada má teplotu chromatičnosti cca 2750 K a index podání barev se pohybuje dle zvoleného typu výbojky v rozmezí 60 až 75.

Porovnávání osvětlený prostor byl jednotlivými zdroji nasvětlen vždy na hladinu osvětlenosti 5 lx. Testu se zúčastnilo 61 pozorovatelů ve věkovém rozmezí 16 až 60 let. Cílem bylo vyjádření preferencí k jednotlivým světelným scénám. Schematické zobrazení preferencí je na obr. 18.



Obr. 18 Diagram preferencí mezi tzv. žlutým a bílým světlem [30]

Tento test není plně průkazný k hodnotícím závěrům. Co z něj však lze usuzovat, jsou vysoké (až 90 %) preference pro osvětlení, které poskytuje vyšší podání barev a chladnější barvu světla. Posuzované bílé světlo také mohlo být pro respondenty příjemnější z důvodu podpory tyčinkového mezopického vidění při nízkých hladinách osvětleností, neboť při stejné hladině osvětlenosti u vysokotlaké sodíkové výbojky je světelný vjem menší.

Obecně tato problematika a korelace mezi kladným hodnocením bílého světla a Kruithofovým diagramem ve světelných scénách podmínek mezopického vidění si žádá hlubšího studia a experimentů. Až na základě podrobnějších testů, ve kterých budou zváženy okolní vlivy kvantitativních a kvalitativních parametrů, lze vyslovit souvislosti a doporučení pro zodpovědnou volbu barvy světla s odpovídajícími parametry pro venkovní osvětlení.

4 Návrh osvětlovací soustavy pomocí opticky podobných svítidel s vysokotlakými sodíkovými výbojkami a výkonovými LED

4.1 Normy pro osvětlování pozemních komunikací

Pro odpovídající návrh a posouzení fotometrických veličin je třeba užít standardu ve formě norem. V ČR jsou normy pro osvětlení pozemních komunikací v souladu se souborem norem evropských. Pro osvětlování pozemních komunikací je zde norma ČSN EN 13201.

4.1.1 Norma ČSN EN 13201(36 0455) a její části:

- ČSN CEN/TR 13201-1 Osvětlení pozemních komunikací – **Část 1: Výběr tříd osvětlení**

Tato norma poskytuje vodítko pro výběr jednotlivých tříd osvětlení. Ty jsou vybírány za zvážení předpokladů, jako je intenzita provozu, možnosti orientace na vozovce, úroveň požadované bezpečnosti či za zvážení předpokladu vlivu počasí. Je určena pro pevné osvětlovací soustavy připínavající k bezpečnosti osob, majetku a dopravy. [6]

- ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací – **Část 2: Požadavky**

Norma se věnuje stanovení jednotlivých hladin osvětleností či jasů dle zvolených tříd osvětlení tak, aby respektovala požadavky na potřebný vizuální výkon v dané třídě. Její koncepce umožňuje rozvoj osvětlení, a zároveň je brán zřetel na ekologickou stránku věci. [7]

- ČSN EN 13201-3 Osvětlení pozemních komunikací – **Část 3: Výpočet**

Zde jsou definovány výpočtové metody a postupy při měření a kontrole fotometrických veličin, což vede k zajištění korektnosti a správného dodržení parametrů z části 2: Požadavky. Takto získané výsledky kontrolních výpočtů pak vedou k objektivně srovnatelným výsledkům v oblasti navrhování VO. [8]

- ČSN EN 13201-4 Osvětlení pozemních komunikací – **Část 4: Metody měření**

Účelem této normy je definování postupů při fotometrických měřeních pozemních komunikací z hlediska osvětleností a jasů. Jsou zde také uvedeny zásady pro polohu pozorovatele a rozmístění kontrolních bodů. Popsány jsou i výjimky, které dovolují se od těchto pravidel odchýlit za stanovených předpokladů. [9]

4.2 Vybraná lokace pro návrh, důvod jejího zvolení a cíl návrhu

K návrhu a následnému porovnání světelných podmínek byla vybrána ulice Blahoslavova nacházející se v centru města Ostravy. Tato lokace byla zvolena z důvodu již instalovaných svítidel se zdroji LED. Jako jediná svého druhu v tomto městě poskytuje možnost posouzení již realizované soustavy z hlediska světelně technických parametrů, energetických parametrů a z hlediska zrakové pohody.

Dalším důvodem, pro zpracování této komunikace byl podnět k přezkoumání osvětlenosti přilehlých chodníků, které oproti vozovce se zdají být nedosvětleny a působí velmi temným dojmem.

Cílem návrhu osvětlení komunikace Blahoslavova je překontrolování původně plánovaných parametrů již realizované osvětlovací soustavy vozovky a přilehlých chodníků. Dalším postupem je realizace nové studie, která doporučí úpravy současného stavu tak, aby byla splněna kritéria požadovaná normou a obecně se zlepšil zrakový výkon v této oblasti a také bezpečnost chodců. Vizualizace očekávaných světelných podmínek chodníků je zobrazena v příloze 7.1 a 7.2.

4.2.1 Popis ulice Blahoslavova

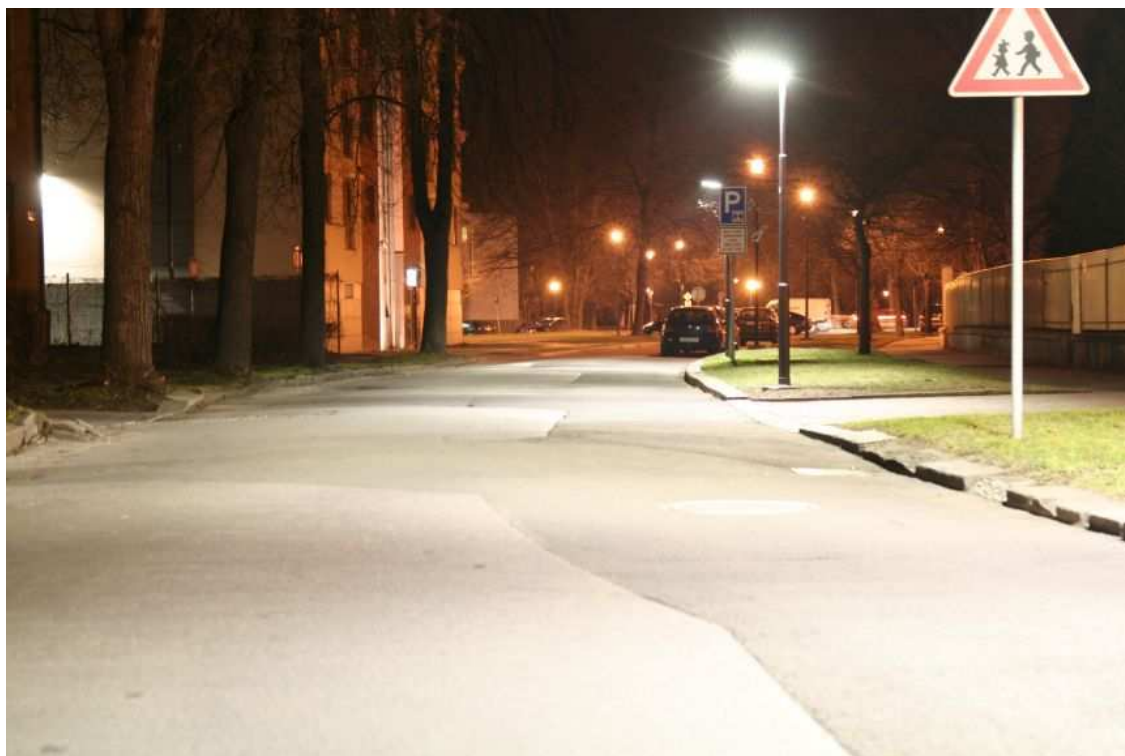
Posuzovaná vozovka s přilehlými chodníky se nalézá v centru města Ostravy, viz příloha 1.1, kde svým severním koncem navazuje na Komenského sady a jižním na areál Nové radnice. Na této ulici se nachází polský konzulát, mateřská školka a několik obytných domů. Severní část je osvětlena soustavou vysokotlakých sodíkových výbojek. Světelné zdroje LED jsou instalovány od podzimu roku 2010 v jižní polovině vozovky s tím, že byly využity stávající stožáry veřejného osvětlení, které jsou situovány na východní straně vozovky. Po obou stranách silnice se nachází pěší chodník oddělený travnatým pásmem. Na západní straně vozovky je na travnatém pásu chodník ještě zastíněn vzrostlými stromy.

Zatřídění komunikace Blahoslavova do třídy osvětlení v souladu s přílohou Generelu VO SMO a dle ČSN EN 13201-2:

Tab. 10 Třída osvětlení komunikace Blahoslavova dle Generelu VO SMO [28]

Blahoslavova	Třída osvětlení	\bar{E}_m	E_{\min}	Podmínka rovnoměrnosti
	S4	$\geq 5 \text{ [lx]}$	$\geq 1 \text{ [lx]}$	$\bar{E}_m \leq 7,5 \text{ [lx]}$

Na obr. 19 je fotografie vozovky, která je přexponována, aby byly patrné stromy na západní (levé) straně. V pozadí fotografie je stávající soustava s vysokotlakými sodíkovými výbojkami nacházející se v severní části vozovky. Osvětlovací soustava se svítidly Stela Long, stejně jako původní soustava, je situovaná na východní straně vozovky – na fotografii vpravo.



Obr. 19 Fotografie ulice Blahoslavova

4.2.2 Popis světelně činných objektů na ulici Blahoslavova

Původní osvětlovací soustava:

- svítidla MARECO LUCE 70W – opálová koule
- světelný zdroj – vysokotlaká sodíková výbojka 70 W

Nová osvětlovací soustava

- Svítidla Indal Stela Long 3010 SRN Neutral White – obr. 20
- Světelný zdroj – 30 LED 32 W / s předřadníkem 36 W
- LED zdroj – Cree XPG White
- Světelný tok svítidla 3700 lm, měrný výkon s předřadníkem 102 lm/W
- Doporučený náklon svítidel Stela Long vůči vodorovné rovině je 10°
- Samočisticí hladká plocha svítidla



Obr. 20 Svítidlo Stela Long

Za další světelně činné objekty v ulici Blahoslavova můžeme považovat původní osvětlovací soustavu v severní části vozovky a také světelný příspěvek v jižní části ulice Blahoslavova ze sousední ulice Sokolská třída, která je zařazena v kategorii ME4b a jsou zde použity jako světelné zdroje vysokotlaké sodíkové výbojky. [28]

4.3 Postup návrhu

4.3.1 Stanovení třídy osvětlenosti

4.3.1.1 Postup zatřídění do třídy osvětlenosti

Postup stanovení tříd osvětlenosti pro ulici Blahoslavova se děje v rámci ČSN CEN/TR 13201-1. Návrh vede přes tabulku stanovení tříd osvětlenosti uvedenou v příloze 2.1, kde nalezneme dle stanovených kritérií, modelovou situaci. Posloupnost vyhledávání je následující:

Pro vozovku Blahoslavova:

- Typická rychlost v km/h – > 30 a ≤ 60
- Hlavní uživatel – motorová doprava, velmi pomalá vozidla
- Jiný povolený uživatel – cyklisté a chodci
- Modelová situace – B1

Pro pěší chodníky na ulici Blahoslavova:

- Typická rychlost – rychlost chůze
- Hlavní uživatel – chodci
- Nepovolený uživatel – motorová vozidla, velmi pomalá vozidla a cyklisté
- Modelová situace – E1

Zjištěnou modelovou situaci si vyhledáme v tabulce příslušné modelové situace. Pro situaci B1 – příloha 2.2 a pro situaci E1 – příloha 2.3, kde dle dalších kritérií již nalezneme třídu osvětlenosti:

Pro vozovku Blahoslavova:

- Převažující počasí – suché
- Geometrická opatření ke zklidnění dopravy – ne
- Hustota křižovatek – < 3
- Náročnost navigace – normální
- Intenzita provozu (počet vozidel za den) – < 7000
- Jas okolí – nízký
- Třída osvětlení – ME5
- Pro třídu ME5 nalezneme v tab. 11 relevantní třídu – **S4**

Tab. 11 Třídy osvětlení porovnatelných¹⁾ úrovní osvětlenosti [6]

	ME 1	ME 2	ME 3	ME 4	ME 5	ME 6		
	MEW 1	MEW 2	MEW 3	MEW 4	MEW 5			
CE 0	CE 1	CE 2	CE 3	CE 4	CE 5			
			S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6
¹⁾ V případě tříd osvětlení ME / MEW se uvažuje standardizovaná tabulka odrazných vlastností povrchu komunikace C2 (povrch třídy CII) uvedená v publikaci CIE 66:1984.								

Pro pěší chodníky na ulici Blahoslavova:

- Riziko kriminality – normální
- Rozeznání obličeje – není potřebné
- Jas okolí – střední
- Třída osvětlení – **S5**

Třídy osvětlení jsou tedy S4 pro vozovku a S5 pro přilehlé chodníky.

4.3.1.2 Doporučení osvětleností přilehlých prostor

V normě ČSN CEN/TR 13201-1v kapitole 6.3 jsou uvedeny požadavky na rozdíly osvětleností mezi přilehlými prostory. Norma říká, že rozdíl by neměl být větší, než dvě porovnatelné třídy, které jsou uvedeny v tab. 11. Zvolené třídy S4 a S5 v prostoru ulice Blahoslavova toto doporučení splňují. [6]

4.3.2 Návrhové programy

Pro návrh světelné situace byly použity výpočty ve dvou návrhových programech.

4.3.2.1 Návrhový program Lighting reality

Tímto programem je v oficiální dokumentaci navrhována LEDková osvětlovací soustava v ulici Blahoslavova. Vzhledem k možnosti porovnat vlastní návrh s návrhem originálním byl zvolen tento program. Návrh v tomto prostředí je směřován pouze k seznámení se s danou problematikou a ověření původního návrhu. Další návrhy pro posouzení osvětlovací soustavy jsou vypočítány v programu DIALux.

4.3.2.2 Návrhový program DIALux 4.9.0.0

Tento návrhový program nabízí velmi adaptivní prostředí a umožňuje navrhnout celou světelnou scénu v jednom výpočtu. Na rozdíl od předešlého programu je zde také možnost položit výpočtové plochy přesně na definovanou oblast.

Neřestí obou zmíněných návrhových programů je nemožnost vložení objektů do navrhované světelné scény. Tudíž propočty nemohou respektovat možné zastínění komunikace či chodníku stromy.

4.3.2.3 Zvolení udržovacího činitele

Udržovací činitel u svítidel Stela je závislí především na poklesu světelného toku, respektive na činiteli stárnutí světelného zdroje. Ten se dá ovlivnit pracovním proudem. Jako optimální variantu napájení svítidel Stela firma Indal doporučuje řídicí proud 350 mA. Po konzultaci se zástupcem firmy Indal je pro tento proud napájející svítidla, která jsou instalována v ulici Blahoslavova, volen udržovací činitel 0,8.

5 Objektivní i subjektivní posouzení realizované osvětlovací soustavy pomocí LED

5.1 Objektivní světelné podmínky na ulici Blahoslavova

Pro práci s mezopickými systémy u konkrétních lokací je třeba prvně zjistit adaptační jasy a spektrální poměry, z nichž jsou následně vypočítávány mezopické světelné technické hodnoty.

5.1.1 Měření a výpočet fotometrických veličin na komunikaci Blahoslavova

5.1.1.1 Měření jasu

Jas byl vyhodnocen jasovým analyzátozem LMK2000 ze snímků pořízených kalibrovaným DSLR fotoaparátem Canon 350D (specifikace se nachází v příloze 5.1). V tab. 12 jsou uvedeny odměřené hodnoty jasu. Vyhodnocující snímky s označenými oblastmi měření jsou v příloze 3.1 a 3.2.

Tab. 12 Průměrné jasy komunikace Blahoslavova

Světelný zdroj	Průměrný jas L_{av}
	[cd/m ²]
HPS	0,222
LED	0,485

Aby bylo možno s těmito jasy pracovat dále, je třeba znát spektrální vlastnosti těchto jasů a spektrální charakteristiky zdrojů, které byly pro vytvoření těchto jasů užity.

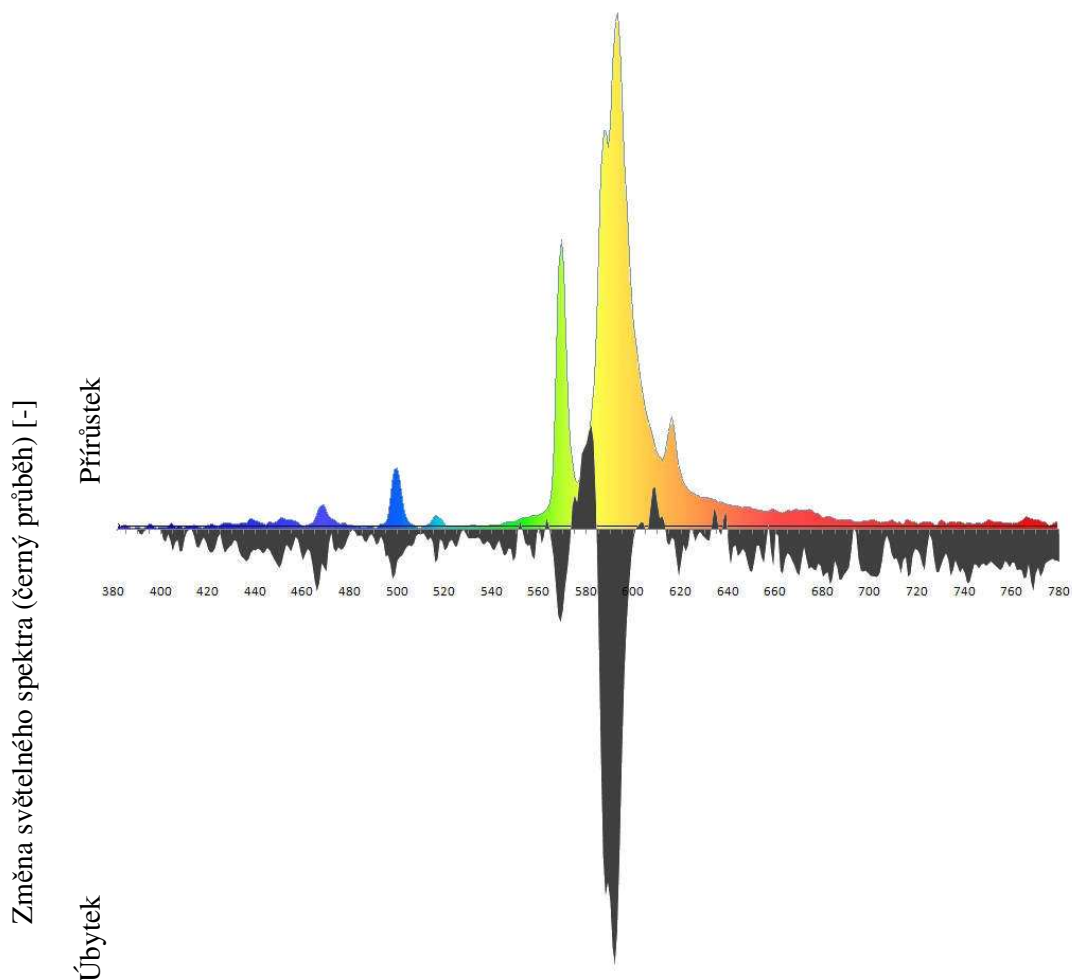
5.1.1.2 Měření spektrálních charakteristik

Pro výpočet poměru *S/P ratio* jsou zapotřebí spektrální charakteristiky zdrojů posuzované světelné situace. Předpokladem je, že pozorovatel sleduje vozovku a adaptuje se na ni a ne na svítidla samotná. Měření spektrálních charakteristik tedy zahrnovalo odměření spekter zdrojů i jejich odraženého světla od vozovky. Měření bylo provedeno přístrojem JETI 1211 vyspecifikovaném v příloze 5.1. Měření proběhlo ve dnech 30. 3. 2011 a 8. 4. 2011. Vždy ve večerních hodinách od 20:30 hod, kdy teplota vzduchu nebyla nižší nebo rovna 10 °C.

Všechny obr. 21 až 24 jsou uvedeny také v příloze 4.1 až 4.4, kde jsou zobrazeny v co největší možné velikosti a rozlišení. Zde v textu se nacházejí jen jako ukázka pro rychlou orientaci v dané problematice.

Odměřená spektra zdrojů se lišila od spekter odražených. Obr. 21 ukazuje spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky, kdy kolorovaná část je spektrem zdroje a šedá stupnice, k níž se vztahuje svislá osa, která je vyjádřením změny spektra po odražení světla zdroje od vozovky.

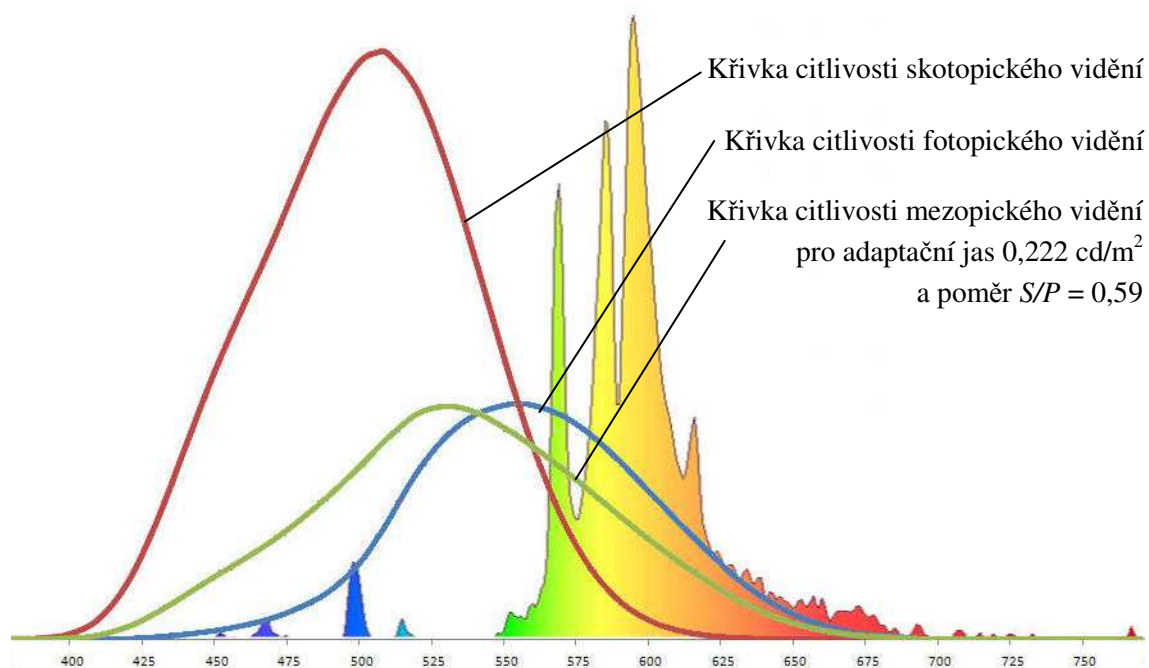
Svislá osa nenese žádnou informaci o velikosti či intenzitě spektrální citlivosti. Velikosti spekter, jejich úbytků a čar spektrálních citlivostí nemohou být dle obrázků poměrově srovnávány. Jde pouze o ilustrační účelné zobrazení.



Obr. 21 Spektrální charakteristika zdroje HPS v ulici Blahoslavova (kolorovaně) a spektrální změna odraženého světla (šedou barvou)

Z grafického vyjádření změny spektra na obr. 21 je patrný úbytek intenzity záření a také spektrálně závislý činitel odrazu. Výrazně je potlačena část spektra v okolí maxima vyzařování výbojky. To, že se v šedě vyjádřeném úbytku spektra nachází i oblasti nad horizontální osou nesvědčí o schopnostech vozovky zesilovat světelný signál, ale je to informace o jiném zdroji světelného záření, jehož spektrální průběh narušuje měření.

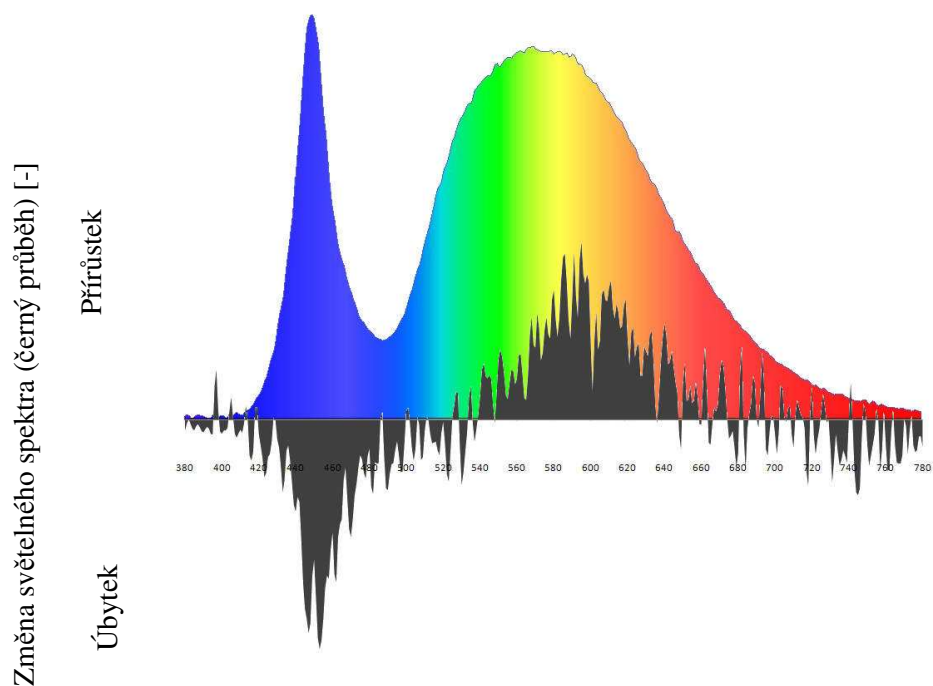
Odražené spektrum proložené křivkami spektrálních citlivostí zraku na obr. 22 ukazuje křivku fotopického, skotopického a adaptovaného mezopického vidění dle systému MES2 pro konkrétní situaci odraženého světla vysokotlaké sodíkové výbojky v ulici Blahoslavova při adaptačním jasu $0,222 \text{ cd/m}^2$.



Obr. 22 Odražený spektrální průběh vysokotlaké sodíkové výbojky od vozovky v ulici Blahoslavova a křivky spektrálních citlivostí zraku

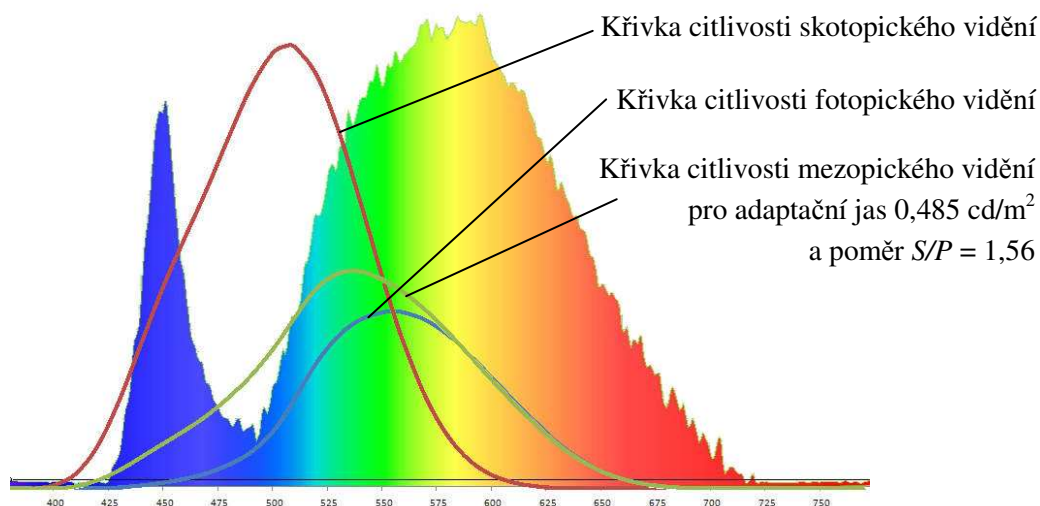
Zelená mezopická křivka na obr. @4 neprochází společným bodem spektrálních křivek citlivostí na hodnotě 555 nm, neboť je již upravena do průběhu, který respektuje poměr S/P ratio, jež pro vysokotlaké sodíkové výbojky upravuje průběh křivky směrem k menší citlivosti zraku.

Změna spektrálního složení po odražení od vozovky a aditivní míchání jiných zdrojů se ještě více projevila u měření charakteristik zdroje LED na obr. 23.



Obr. 23 Spektrální charakteristika zdroje LED svítidla Stela Long (kolorovaně) a spektrální změna odraženého světla (šedou barvou)

Obr 23 ukazuje opět tlumení spektrálních průběhů v oblasti krátkých vlnových délek, kde má jedno ze svých lokálních maxim bílá LED. Posílení v oblasti druhého maxima LED je způsobeno příspěvkem ze sousední osvětlovací soustavy realizované vysokotlakými sodíkovými výbojkami vyzařujícími právě v tomto pásmu. Průběh odraženého spektra společně s proloženými křivkami spektrální citlivosti zraku jsou na obr. 24.



Obr. 24 Odražený spektrální průběh zdroje LED svítidla Stela Long od vozovky v ulici Blahoslavova a křivky spektrálních citlivostí zraku

Mezopická křivka spektrální citlivosti zraku na obr. 24 je spočtena mezopickým systémem MES2 a je přizpůsobena S/P poměru odraženého světla a adaptaci na jasové hladině 0,485 cd/m².

Rozdíly ve spektru odraženého světla uvedených zdrojů můžeme shrnout do dvou bodů:

- První je aditivní míchání záření ze světelných zdrojů nacházejících se v blízkosti měření. Protože je posuzovaná situace reálnou oblastí s jinými zdroji, nemůže být zaručeno přesné laboratorní měření.
- Druhým odůvodněním změny může být spektrálně závislý činitel odrazu vozovky.

Vlivem spektrálních změn se mění i teplota chromatičnosti adaptačního světla. Její změna je vyčíslena v tab. 13.

Tab. 13 Náhradní teplota chromatičnosti zdroje a odraženého světla od vozovky

Světelný zdroj měřeného úseku	T_c	
	K	
	Zdroj samotný	Odražené světlo
HPS	1852	1790
LED	4149	3757

5.1.1.3 Výpočet poměru S/P ratio

Pro výpočet poměru účasti tyčinek a čípků na vidění použijeme rovnici výpočtu *S/P ratio* (1.3), kde za spektrální charakteristiky S_λ dosadíme odměřené průběhy spektrofotometrem. Vzhledem k tomu, že zlomek je poměrový, není třeba řešit rozdílné jasy a osvětlenosti, při kterých byla spektrálních charakteristika změřena. Výsledné hodnoty poměru *S/P* pro světelné zdroje na vozovce Blahoslavova jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Poměr *S/P ratio* přímého a odraženého světla na ulici Blahoslavova

Světelný zdroj měřeného úseku	<i>S/P ratio</i>	
	–	
	Zdroj samotný	Odražené světlo
HPS	0,68	0,59
LED	1,69	1,56

Snížení poměru *S/P ratio* u odraženého světla je způsobeno ztrátou kratších vlnových délek v obsahu spektra, které jsou s vysokým ziskem jinak registrovány tyčinkami. Pakliže tuto

část spektra potlačíme, vliv tyčinek na celkové vnímání bude menší a tudíž i menší celkový měrný výkon tyčinek.

5.2 Subjektivní mezopické světelné podmínky na ulici Blahoslavova

Konkrétní mezopické osvětlenosti a jasy jsou závislé na konkrétních podmínkách posuzované lokace. Do výpočtů vstupují tudíž parametry jako je poměr *S/P ratio* či činitel odrazu vozovky. Proto se mezopické posouzení světelné scény musí dít pro každý případ zvlášť.

První část této kapitoly se bude věnovat postupu výpočtu fotometrických mezopických hodnot pro třídu osvětlení S4 na modelovém příkladu ulice Blahoslavova. Další část pak porovnává výsledky, které podávají jednotlivé mezopické systémy při reálných světelných podmínkách ulice Blahoslavova.

5.2.1 Úprava hodnot klasifikace třídy S4 pro mezopické vidění

Následující postup výpočtu je ukázkou získání mezopicky vnímaných hodnot osvětleností za použití konkrétních svítidel. Pro přepočítání je použit mezopický systém MES2.

5.2.1.1 Vstupní hodnoty

Pro stanovené hladiny osvětlení třídy S4, které jsou ve fotopických veličinách, platí:

Průměrná osvětlenost	\bar{E}_m	5 lx
Minimální osvětlenost	E_{min}	1 lx

Pro tyto udané hodnoty osvětlenosti se může pomocí činitele spektrálního odrazu odvodit požadovaný průměrný jas vozovky dle vztahu (5.1):

$$\rho E_m = \pi L \quad (5.1)$$

po vyjádření:

$$L = \frac{\rho E_m}{\pi} \quad (5.2)$$

po dosazení a předpokladu středního činitele odrazu vozovky $\rho = 0,13$

Průměrný jas	L	0,207 cd/m ²
--------------	-----	-------------------------

K získání mezopického jasového údaje z tabulky systému MES2 je třeba také znát poměr *S/P ratio* světelných zdrojů iluminujících komunikaci. Na tento výpočet jsou použity konkrétní spektrální charakteristiky dvou různých světelných zdrojů z ulice Blahoslavova, jimiž jsou vysokotlaká sodíková výbojka (HPS) a světloemitující dioda (LED). Pro doplnění je uvedena také indukční výbojka, která se však v reálné situaci ulice Blahoslavova nenachází. Uvedený *S/P ratio* v tab. 15 je vždy vyjádřen pro odražené spektrum světla vozovky z důvodu směru pohledu uživatele silnice na vozovku a ne do svítidla.

Tab. 15 *S/P poměr* pro jednotlivé světelné zdroje

Odražené světlo ze zdroje	S/P poměr	T _c
	-	K
HPS	0,68	1790
LED	1,69	3757
Indukční výbojka	1,85	4866

5.2.1.2 Přepočet fotopických fotometrických hodnot dle systému MES2

Z vypočtených vstupních hodnot fotopického jasu a *S/P* poměru se dle tab. 16 odečtou procentuální průměry změny fotopického jasu oproti vnímanému mezopickému.

Tab. 16 Mezopický jas v procentech fotopického jasu pro systém MES2 [4]

	<i>S/P ratio</i>	Fotopický jas [cd/m ²]								Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	2	3	5	
LPS ~	0,25	-75	-52	-29	-18	-9	-5	-2	0	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-55	-34	-21	-13	-6	-3	-2	0	
HPS ~	0,65	-31	-20	-13	-8	-4	-2	-1	0	
	0,85	-12	-8	-5	-3	-2	-1	0	0	
MH teple bílá ~	1,05	4	3	2	1	1	0	0	0	
	1,25	18	13	8	5	3	1	1	0	
	1,45	32	22	15	9	5	3	1	0	
	1,65	45	32	21	13	7	4	2	0	
MH denní světlo ~	1,85	57	40	27	17	9	5	3	0	
	2,05	69	49	32	21	11	6	3	0	
	2,25	80	57	38	24	12	7	4	0	
	2,45	91	65	43	28	14	8	4	0	
	2,65	101	73	49	31	16	9	5	0	

V tab. 16 jsou naznačeny odečítané oblasti procentuální změny, ze kterých je následně vytvořen průměr a uveden v tab. 17.

Tab. 17 Procentuální změna fotopicky vnímaného jasu na mezopicky vnímaný

Pro adaptaci na odražené světlo zdroje	Změna jasu
	%
HPS	- 13,75
LED	14,50
Indukční výbojka	22,00

5.2.1.3 Převod mezopických jasů do fotopických hodnot

Pokud norma pro třídu komunikace S4 požaduje \bar{E}_m rovno 5 lx, předpokládáme, že vypočtený fotopický jas 0,206 cd/m² můžeme pro účel splnění normy považovat také za hodnotu vnímanou mezopicky. Tato teoreticky vnímaná hodnota by pak byla adekvátní při poměru *S/P* rovnému 1, což také vyplývá z tab. 16. Následně by se hodnoty jasů měnili v závislosti na poměru *S/P ratio* adaptačního světla, které je k vytvoření takového jasu užito.

V tab. 18 je procentuelně i hodnotou vyjádřen fotopický jas, získaný konkrétním světelným zdrojem, při kterém je mezopický vjem jasu vždy 0,206 cd/m².

Tab. 18 Změna fotopického jasu při konstantě vnímaném mezopickém jasu

Zdroj	Procentuální změna fotopického jasu	$L_{fotopický}$
	%	cd/m ²
HPS	113,75	0,239
LED	85,50	0,180
Indukční výbojka	78,00	0,170

Pro získání mezopického vjemu 0,206 cd/m² je tedy třeba užít pro zdroje HPS vyšší hladinu osvětlenosti. Pro zdroje s poměrem *S/P* větším než 1 je hladina osvětlenosti, která způsobí mezopický vjem jasu 0,206 cd/m², nižší.

Požadované hodnoty osvětleností uvedené v tab. 19 získáme přepočtem opět pomocí vzorce (5.1) při vyjádření \bar{E}_m :

$$E_m = \frac{\pi L}{\rho} \quad (5.3)$$

Tab. 19 Přizpůsobené fotopické osvětlenosti pro jednotlivé světelné zdroje

	Dle normy \bar{E}_m	Přizpůsobeno		
		HPS	LED	Indukční výbojka
	Fotopická osvětlenost [lx]	Fotopická osvětlenost [lx]		
Třída S4	5	5,78	4,35	4,11

Hodnoty osvětleností pro jednotlivé typy světelných zdrojů ukazují vliv mezopického vidění na subjektivní vnímání při jasech v oblasti veřejného osvětlování. Otázka energetických úspor v této oblasti je diskutabilní a vyžadovala by si podrobnější studium dané problematiky.

Otázkou je, jestli by mělo energetický smysl zavádět změnu normy například pro rozpětí osvětlenosti 2 lx vzhledem jedinému faktoru, kterým je vnímání mezopických hladin osvětleností za použití různých světelných zdrojů s odlišnými poměry *S/P ratio*. Zajímavou studií a vyhodnocením by bylo zvážení dalších faktů a jejich integrace do problematiky. Mezi těmito dalšími fakty je například reakční doba při osvětlení zdroji s vysokým poměrem *S/P*, přirozenost bílého světla na psychologii pozorovatele či vyšší citlivost periferního vidění v mezopických adaptačních podmínkách.

5.2.2 Výpočet mezopického jasu na ulici Blahoslavova

V bodě 5.2.1 byl naznačen jeden z možných postupů výpočtu mezopických fotometrických hodnot. Problematika výpočtu reálných situací je však mnohem komplikovanější. Je to dáno více uvedenými mezopickými systémy popsány v bodě 1.3.

Jasové poměry ulice Blahoslavova byly v tab. 20 převedeny na mezopické jasy s použitím 4 mezopických systémů vždy pro dva adaptační jasy, kdy pro každý adaptační fotopický jas jsou uvedeny dva typy světelných zdrojů.

Tab. 20 Mezopické jasy komunikace Blahoslavova

Fotopické jasy komunikace Blahoslavova				
0,222 [cd/m ²]			0,485 [cd/m ²]	
Osvětleno zdrojem HPS			Osvětleno zdrojem LED	
HPS	imag. LED		imag. HPS	LED
Mezopický jas [cd/m ²]			Mezopický jas [cd/m ²]	
USP	0,184	0,247	0,431	0,447
Move	0,191	0,250	0,421	0,551
Mes1	0,1965	0,243	0,433	0,537
Mes2	0,197	0,244	0,434	0,538
Pozn.	Barevné rozlišení pro snadnější orientaci v tabulce:			
	Zelená – maximální hodnota jasu pro daný sloupec (světelný zdroj)		Červená – maximální hodnota jasu pro daný sloupec (světelný zdroj)	

Tab. 20 popisuje chování mezopických systémů pro dva různé fotopické jasy, z nichž u každého jsou použity dva různé světelné zdroje. Například pro první dvojsloupek s nadpisem „Osvětleno pomocí HPS“ je uveden jas $0,222 \text{ cd/m}^2$. Tento jas je skutečným jasnem v podmínkách ulice Blahoslavova v severní části, kde jsou instalovány zdroje HPS – neboli vysokotlaké sodíkové výbojky. Ve sloupečku „HPS“ jsou pak uvedené mezopické jasy tohoto konkrétního případu dle jednotlivých mezopických systémů.

Pro porovnání je zde sloupeček „imag. LED“ neboli imaginární LED. Jde o výpočet, kdy by stejná fotopická světelně-jasová situace ($0,222 \text{ cd/m}^2$) byla realizována zdroji LED. Obdobou je pak druhý svojsloupek „Nasvětleno pomocí LED“, kdy je zde opět ke srovnání imaginární soustava „img. HPS“ produkující stejnou fotopickou jasovou situaci jako skutečná svítidla se zdrojem LED ($0,485 \text{ cd/m}^2$).

Rozdíly mezi jednotlivými výsledky mezopických systémů u vnímaných jasů pro jeden světelný zdroj jsou v jednotkách procent. Podstatný rozdíl je však při použití zdrojů s velmi odlišným poměrem S/P . Vnímané jasy se pak mohou lišit až o čtvrtinu své hodnoty. Pokud by byl adaptační jas o řád menší, byl by rozdíl mezi vnímanými mezopickými úrovněmi jasu při užití stejných světelných zdrojů více než 70 %.

Tab. 20 nepodává žádnou informaci o vhodnosti či nevhodnosti jednotlivých systémů, stejně jako z ní nelze komplexně usuzovat o charakterech jednotlivých systémů. Smyslem tohoto porovnání je ukázat možnosti a cesty, kterými se mezopická fotometrie ubírá a obecně naznačit filozofii tohoto přístupu k dané problematice.

6 Vyhodnocení vypočtených osvětlovacích soustav z pohledu kvalitativních i kvantitativních parametrů

6.1 Měření osvětleností současných osvětlovacích soustav na ulici Blahoslavova

V následujících bodech obsahujících měření dvou osvětlovacích soustav v ulici Blahoslavova je zdůvodněna potřeba nového návrhu osvětlovací soustavy z důvodu úpravy osvětlenosti. Měření probíhalo 24. 3. 2011 od 21:30 hodin. Měření bylo provedeno přístrojem mini-LUX, jehož specifikace se nachází v příloze 5.1.

Volba kontrolních bodů u všech měření byla stanovena dle doporučení a odkazu v normách ČSN EN 13201-3 a ČSN EN 13201-4:

Rozteč kontrolních bodů v podélném směru vozovky:

$$D = \frac{S}{N} \quad (6.1)$$

kde:

- D je rozteč mezi body v podélném směru v metrech
 S je rozteč mezi svítidly téže řady v metrech
 N je počet výpočtových bodů v podélném směru nabývajících těchto hodnot:
pro $S \leq 30$ m, $N = 10$

Počet bodů v podélném směru je volen 10 s roztečí 2 metry.

Rozteč v příčném směru je určena rovnicí:

$$d = \frac{W_L}{3} \quad (6.2)$$

kde:

- d je rozteč mezi body v příčném směru měřená v metrech
 W_L je šířka pásu měřená v metrech

Počet kontrolních bodů je zvolen o jeden vyšší, než kolik doporučuje norma, neboť u měřené vozovky Blahoslavova jde o přesnější zmapování rovnoměrnosti osvětlenosti. Počet bodů v příčném směru je pro měření 3 s odsazením od krajnice 0,5 m a roztečí bodů 2,5 m.

6.1.1 Měření soustavy se zdroji HPS

V severní části ulice Blahoslavova byla změřena stará osvětlovací soustava se svítidly s vysokotlakými sodíkovými výbojkami. Měření obsahovalo kontrolu osvětleností chodníků

oddělených od silnice travnatým pruhem (na každé straně vozovky jeden chodník) a také kontrolu osvětlenosti vozovky. Přehled odměřených hodnot v tab. 21 znázorňuje graficky oba chodníky a vozovku. Číslo svítidla je bráno jako pořadí světelného místa s HPS směrem od LEDkové osvětlovací soustavy.

Tab. 21 Graf osvětlenosti ulice Blahoslavova zdroji HPS, hodnoty jsou v lx

3,3	3,5	3,0	2,6	2,2	1,6	2,8	2,0	2,2	2,6
západní strana									
5,3	5,0	4,5	3,0	3,1	3,6	3,9	4,1	5,0	5,2
5,0	5,1	4,6	5,0	4,2	4,6	4,7	4,9	3,6	5,1
stíněno	2,3	5,3	5,7	5,2	5,2	5,5	5,8	4,2	2,2
svítidlo č.2		východní strana				strom		svítidlo č.3	
6,0	7,1	6,5	5,5	4,8	4,3	4,1	4,8	3,0	3,6

Odměřené hodnoty již nebyly upravovány činitelem údržby, neboť se jedná o starou osvětlovací soustavu. Vyhodnocení světelných parametrů se nachází v tab. 22.

Tab. 22 Vyhodnocení osvětleností ulice Blahoslavova zdroji HPS

		Předepsáno dle normy	Západní chodník	Vozovka	Východní chodník
Třída osvětlenosti	-	lx	S4	S4	S4
\bar{E}_m	lx	≥ 5	2,58	4,51	4,97
E_{min}	lx	≥ 1	1,60	2,20	3,00
Podmínka rovnoměrnosti	lx	$\leq 7,5$	3,50	5,70	7,10
Rovnoměrnost	-	-	0,62	0,49	0,60
Celkově	-	-	nevyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje

Stávající osvětlovací soustava s vysokotlakými sodíkovými zdroji nevyhověla podmínkám nutným ke splnění požadavků osvětlenosti třídy S4.

6.1.2 Výsledky měření soustavy se zdroji LED

Jižní část ulice Blahoslavova byla stěžejním měřením, neboť právě zde šlo o zjištění osvětlenosti chodníků a podmínky rovnoměrnosti rozložení osvětlenosti na vozovce. Měřicí oblast osvětlenosti byla zvolena tak, aby vliv okolního světla byl pokud možno co nejmenší. Paradoxně se i tak měřicí oblast nachází hned vedle předělu mezi soustavami se svítidly s HPS zdroji a zdroji LED. To z toho důvodu, že v jiných částech soustava sousedí s komunikací Sokolovská, která je zařazena do vyšší třídy osvětlenosti, a jejíž osvětlení výrazně zasahuje do světelných podmínek soustavy se zdroji LED. V zastíněné části, kde jsou domy mezi těmito dvěma komunikacemi, se nachází polský konzulát, jehož architektonické osvětlení sodíkovými

výbojkami v opálových koulích také vnáší do měření značnou chybu. Měřicí pole bylo tedy zvoleno co nejšetrněji, i když se jeho poloha zdá být nerozumnou.

Označení svítidel je pořadovým číslem stožáru; počítáno od předělu mezi soustavami. Udržovací činitel pro toto měření byl zvolen 0,8 z důvodu novosti této soustavy, která je nyní v provozu zhruba půl roku. V tab. 23 jsou uvedeny odměřené hodnoty osvětleností. Následuje tab. 24, která tyto hodnoty shrnuje s normou požadovanými parametry.

Tab. 23 Graf osvětlenosti ulice Blahoslavova zdroji LED, hodnoty jsou v lx

0,6	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3
strom	strom	západní strana				strom	strom		
4,8	5,3	4,6	3,5	4,6	2,3	2,2	3,0	5,0	5,0
12,6	16,1	14,4	10,0	5,6	3,6	3,4	7,0	12,3	21,2
29,7	41,0	20,5	8,5	4,2	2,7	2,4	5,4	13,7	31,8
svítidlo č.2		východní strana						svítidlo č.1	
0,5	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,7

Tab. 24 Vyhodnocení osvětlenosti ulice Blahoslavova zdroji LED

		Předepsáno dle normy	Západní chodník	Vozovka	Východní chodník
Třída osvětlenosti	-	lx	S4	S4	S4
\bar{E}_m	[lx]	≥ 5	0,53	10,64	0,47
E_{min}	[lx]	≥ 1	0,30	2,20	0,20
Podmínka rovnoměrnosti	[lx]	$\leq 7,5$	0,60	41,00	0,70
Rovnoměrnost	-	-	0,75	0,21	0,64
Celkově	-	-	nevyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje

Soustava s LED svítidly je z hlediska normy nevyhovující. Její parametry nejsou sto splnit požadavky žádné z definovaných tříd osvětlenosti kategorie S. Problémem je nejen prostor chodníků, který je nedostatečně osvětlen a tvoří tak tmavé tunely lemující vozovku, ale i značná nerovnoměrnost osvětlení vozovky.

6.2 Návrhy osvětlovacích soustav

6.2.1 Návrh původní osvětlovací soustavy s LED zdroji

V návrhovém programu Lighting Reality byla namodelována současná situace se svítidly Stela Long v ulici Blahoslavova. Oproti originálnímu projektu byly nyní zohledněny i výpočty osvětleností chodníků. Zastínění stromy však nemohlo být namodelováno z důvodů nepodpory takovýchto operací ve výpočetním programu. Tab. 25 shrnuje výsledky návrhu a vyjadřuje se k požadavkům norem pro osvětlování komunikací.

Tab. 25 Vyhodnocení původního návrhu osvětleností ulice Blahoslavova

		Předepsáno dle normy	Západní chodník	Vozovka	Východní chodník
Třída osvětlenosti	-	Lx	S4	S4	S4
\bar{E}_m	[lx]	≥ 5	0,48	12	0,68
E_{min}	[lx]	≥ 1	0,4	3,4	0,5
Podmínka rovnoměrnosti	[lx]	$\leq 7,5$	0,5	34,1	1,2
Rovnoměrnost	-	-	0,83	0,28	0,74
Požadavkům normy:	-	-	nevyhovuje	nevyhovuje	nevyhovuje

Návrh potvrdil výsledky měření; nevhodnost nasvětlení vozovky i přilehlých chodníků. Grafické zobrazení návrhu a nastavení programu je přiloženo v příloze 6.1 a 6.2.

6.2.2 Návrh nové osvětlovací soustavy s LED zdroji

Pro návrh zlepšení světelných podmínek byl použit program DIALux, který umožňuje komplexní návrh celé světelné situace.

Původní vize na zlepšení vizuálních podmínek se ubírala směrem zachování stávajících svítidel a jejich výkonu za změny výšky světelného bodu. S postupem návrhu se však ukázalo, že tato cesta vede k stožáru o výšce 10 metrů pro splnění podmínek normy. I kdyby tato možnost byla realizovatelná, pak okolní stromy by zastínili jak vozovku, tak chodníky a situace by zůstala opět nevyřešena.

Dalším směrem byla možnost snížení výkonu zdrojů LED. Tím by se dosáhlo nejen optimálních světelných podmínek, ale také vzhledem k nižšímu řídicímu proudu protékajícímu zdrojem LED, by se prodloužila doba životnosti zdroje a snížil by se příkon svítidla, což by vedlo k vyšším energetickým úsporám nového řešení. Snížení vlivu rušivého světla by také mohlo být jedním z kladů tohoto řešení.

Tato druhá varianta byla zvolena jako výchozí pro další postup návrhu. Dle materiálů od firmy Indal, byla zvolena hodnota protékaného proudu zdroji LED 250mA, což vede u svítidla Stela Long 30 LED – cool white, ke snížení světelného toku z 3700 lm na 2750 lm. Celkový příkon svítidla poklesne z 36 W na 26 W.

Vzhledem k umístění osvětlovací soustavy ve městě s těžkým průmyslem a relativně dlouhé době života zdroje, po kterou je třeba zaručit stálé světelné podmínky je zvolena hodnota udržovacího činitele 0,75, oproti výrobcem běžně doporučené hodnotě 0,8.

V tab. 26 jsou uvedeny požadavky na osvětlenosti vozovky a chodníků, které byly definovány v bodě 4.3.1.1 na základě normy ČSN CEN/TR 13201-1.

Tab. 26 Třída osvětlení komunikace Blahoslavova určená v kapitole 4.3.1.1

Třída osvětlení	\bar{E}_m	E_{\min}	Podmínka rovnoměrnosti
	lx	lx	lx
S4	≥ 5	≥ 1	$\bar{E}_m \leq 7,5$
S5	≥ 3	$\geq 0,6$	$\bar{E}_m \leq 4,5$

Výpočtový projekt vygenerovaný programem DIALux, kde jsou zobrazeny rozměry vozovky, travnatých ploch i chodníků, jejich výsledné osvětlenosti a technické parametry soustavy je přiložen v příloze 8.1 až 8.9.

Požadavky na splnění norem u osvětlovací soustavy ulice Blahoslavova byly dosaženy při navržených technických parametrech:

- Svítidlo: INDAL STELA LONG
- Světelný tok svítidla: 2750 lm
- Výkon svítidla: 26.0 W (při 250 mA)
- Umístění: jednostranně
- Vzdálenost sloupů: 20.000 m
- Výška světelného bodu: 7.500 m
- Přesah: -0.779 m
- Sloup – vozovka: 0.800 m
- Sklon ramene: 10.0 ° Pozn: Odklon od vodorovné roviny

Celkový souhrn fotometrických parametrů návrhu komunikace je vyhodnocen v tab. 27.

Tab. 27 Vyhodnocení návrhu úpravy osvětlovací soustavy ulice Blahoslavova

		Západní chodník	Vozovka	Východní chodník
Třída osvětlenosti	-	S5	S4	S5
\bar{E}_m	[lx]	3,10	6,14	3,09
E_{\min}	[lx]	2,19	4,06	2,28
Podmínka rovnoměrnosti	[lx]	3,96	7,25	4,15
Rovnoměrnost	-	0,71	0,66	0,74
Požadavkům normy:	-	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Navržená světelná situace nyní splňuje požadavky normy. Problémem zůstává technická realizace projektu. Výška stožáru 7,5 metrů je výškou dvojnásobnou, oproti stávající výšce 3,7 metru. Tento fakt může vést k mírnému zastínění svítidel stromy, jež se nacházejí v travnatém předělu mezi chodníky a vozovkou. Stromy jsou však vzrostlé a jejich větvový nemá tendenci zastínit svítidlo v navrhované výšce.

6.3 Vyhodnocení dalších parametrů

6.3.1 Světelné parametry

Kvantitativní parametry navrhnuté osvětlovací soustavy byly hodnoceny v předchozích bodech, neboť na jejich základech byla posuzována vhodnost a stupeň splnění požadavků dané **třídy osvětlení**, případně **jasové poměry** důležité pro oblast mezopického vidění. Z dalších kvantitativních parametrů je v bodě následujícím uveden **příkon** a možnosti úspor elektrické energie.

Kvalitativní parametry řešených soustav se značně liší.

Například **index podání barev** je veličina, která je u porovnávaných soustav v této práci velmi rozdílná. Indexy barevného podání R_a jsou na ulici Blahoslavova pro zdroj (měřeno JETI 1211):

- HPS 6 [-]
- LED 73 [-]

Index barevného podání a jeho psychologický vliv na pozorovatele je blíže popsán v kapitole 3.1.2. Obecně však lze říci, že vyšší index barevného podání vede k subjektivní zrakové pohodě a většímu pocitu bezpečí.

Pro svítidlo Stela Long 30LED provozované při řídicím proudu 250 mA není údaj indexu podání barev přesně znám. Ač se jedná o stále stejné svítidlo STELA LONG jen napájené nižším proudem, bylo by třeba index podání barev znovu ověřit měřením, neboť snižování výkonu LED se projeví na hodnotě R_a .

Délka života je u posuzovaných soustav také velmi rozdílná. Pro předpokládané hodnoty těchto parametrů pro jednotlivé zdroje při je to pak:

- HPS – 16 000 hodin provozu doby života
- Stela Long LED (350 mA) – 50 000 hodin provozu při garantovaném poklesu světelného toku maximálně o 20%
- Stela Long LED (250 mA) – 100 000 hodin provozu při garantovaném poklesu světelného toku maximálně o 30% nebo 20 let provozu

Náhradní teplota chromatičnosti jednotlivých typů zdrojů je také odlišná. Tato problematika je obecně rozebrána v bodě 3 a hodnoty T_c svítidel jsou uvedeny v bodě 5.1.1.2 v tab. 13.

6.3.2 Energetické parametry osvětlovacích soustav ulice Blahoslavova

Energetické parametry osvětlovacích soustav jsou nedílnou součástí realizovaných projektů, neboť míra úspor za elektrickou energii se značně promítá do celkového hodnocení jednotlivých návrhů a možnosti porovnání vybraných svítidel či jejich návrhových variant.

Důvodem realizované výměny svítidel s vysokotlakovými sodíkovými výbojkami za svítidla se zdroji LED v ulici Blahoslavova byla právě možnost úspor ve veřejném osvětlení. Energetická bilance stávající soustavy se zdroji HPS, soustavy svítidel Stela Long 30LED a nově navrhnutého řešení se sníženým příkonem je popsána tabulkou tab. 28.

Tab. 28 Energetická bilance stávajících osvětlovacích soustav a soustavy navrhnuté

	Příkon	Roční spotřeba el. energie	Roční úspora el. energie oproti soustavě se zdroji HPS
	P [kW]	W_{rok} [kWh/rok]	ΔW_{rok} [kWh/rok]
Stávající soustava HPS	0,850	3400	-
Nová soustava LED (350 mA)	0,360	1440	1960
Navrhnutá soustava LED (250 mA)	0,260	1040	2360

Spotřeba elektrické energie nově navrhnuté soustavy je třetinová oproti původní vysokotlaké sodíkové soustavě. Pokud by byla sestavována ekonomická rozvaha jednotlivých investičních variant, pak míra spotřebované energie a několikanásobná životnost zdroje LED oproti vysokotlakému sodíku nejspíše převýší i fakt vyšších pořizovacích nákladů varianty s LED zdroji.

7 Závěr

Tato diplomová práce stojí na dvou hlavních pilířích. Jedním je popis mezopického vidění a jeho užití v praxi při uvážení světelných zdrojů LED. Druhým pilířem je návrh úpravy osvětlovací soustavy v ulici Blahoslavova, což je v současnosti jediná vozovka osvětlená LED zdroji ve městě Ostrava. Světelné parametry této osvětlovací soustavy jsou nevyhovující předepsané normě.

Během zkoumání a popisu mezopického vidění se ukázalo několik velmi zajímavých podnětů, které měli tendenci stát se cílem. Popisovaná problematika mezopického vidění totiž není běžnou praxí. Původním záměrem v této oblasti byl návrh měřicího přístroje, který by dokázal mezopické světelné veličiny měřit. Jak se ukázalo, toto vidění není závislé pouze na adaptačních hladinách jasu, ale také na spektrálním průběhu světelného zdroje, což znemožňuje návrh unifikované sady filtrů pro měřicí přístroj, neboť chyba, které by měření dosahovalo, by byla neúměrná k poskytnuté informaci o světelných podmínkách.

Pro další postup byl za cíl zvolen popis matematických vyjádření mezopického vidění v praxi. Díky možnostem osvětlovací soustavy vozovky Blahoslavova, která je tvořena jak novými zdroji LED, tak z části původní soustavou s vysokotlakými sodíkovými výbojkami, bylo možno odměřit všechny potřebné světelné veličiny pro srovnání a aplikovat mezopické podmínky vidění právě na tuto vozovku. Výsledkem pak je srovnání uvedené v bodě 5.2.2 kdy v tab. 20 jsou jasně vidět rozdíly ve vnímání stejných jasů různých světelných zdrojů.

Ještě názornější ukázka možností mezopického vidění je znázorněna v bodě 5.2.1 v tab. 19. Zde je fotopická osvětlenost vozovky, pro kterou bude mezopický vjem vždy 5 lx, spočtena pro různé světelné zdroje. Díky tomu, že zdroje vyzařující světlo na kratších vlnových délkách způsobují vyšší světelný vjem, je možno fotopické hladiny osvětleností snížit se zachováním vizuální kondice jako při užití zdrojů vyzařujících především na dlouhých vlnových délkách.

Druhým pilířem byla kontrola současné světelné situace vozovky Blahoslavova. Původní osvětlovací soustava realizovaná vysokotlakými sodíkovými výbojkami neodpovídala požadavkům normy. Její náhrada se svítidly s LED zdroji však také neodpovídá požadavkům. Proto byla navržena nová soustava, která vychází z té současné a to z důvodu minima nutných změn k dosažení vhodných světelných parametrů. To se povedlo za podmínky změny výšky stožáru svítidla a snížení napájecího proudu LED zdrojů, což vede k úsporám elektrické energie.

Za přínos této diplomové práce považuji především zpracování problematiky mezopického vidění, která v českých kruzích není nikde v dostupné literatuře dokumentována a popsána v takovém rozsahu, jaký je uveden v této diplomové práci. Stejně tak věřím, že se částí z této diplomové práce mohou stát učební pomůckou pro výklad mezopického vidění ať už na

akademické půdě, tak i pro odbornou veřejnost. Konkrétní pasáže této práce již byly použity při spolupráci VŠB-TUO a společnosti Ostravské komunikace a.s.

Osobní přínos této diplomové práce je pak ve vytvoření rozsáhlého základu pro postgraduální studium. Oblast mezopického vidění nabízí nespočet možností a zaměření. Věřím, že tento výzkumný potenciál bude možné v budoucnu bohatě využít.

8 Použité zdroje

- [1] Bris [online]. [cit. 2011-01-03]. *Light and dark adaption*. Dostupné z WWW: <http://www.chm.bris.ac.uk/webprojects2003/white/light_and_dark_adaptation.htm>.
- [2] CARR, Joseph; ROON, Tony. Sentex [online]. 2010-10-26 [cit. 2010-12-02]. LED and other solid-state lighting sources. Dostupné z WWW: <<http://www.sentex.ca/~mec1995/tutorial/Leds/Leds.html>>.
- [3] CIE [online]. 2010 [cit. 2011-04-9]. *CIE AND MESOPIC PHOTOMETRY*. Dostupné z WWW: <<http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENUE/About+us/CIE+Newsletter/Artikel+1+Oktober>>.
- [4] CIE 191-2010 Recommended system for mesopic photometry based on visual performance., 2010. 73 s. ISBN 9783901906886.
- [5] Cree [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.cree.com>>.
- [6] ČSN EN 13201-1. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 1: Výběr tříd osvětlení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006. 30 s.
- [7] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Výkonnostní požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004. 17 s.
- [8] ČSN EN 13201-3. *Osvětlení pozemních komunikací – část 3: Výpočet výkonnostních parametrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004. 33 s.
- [9] ČSN EN 13201-4. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 4: Metody měření výkonnostních parametrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004. 16 s.
- [10] DUPUIS, Russell D. ; KRAMES, Michael R. . *History, Development, and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes*. In Journal of Lightwave Technology [online]., 2008 [cit. 2010-12-02]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04542883>>.
- [11] ERDMANN, Dick. *Color Rendering Index (CRI)*. *GE Lighting*, 2 s. Dostupné z WWW: <http://www.gelighting.com/na/business_lighting/education_resources/literature_library/white_papers/download/color_rendering_index.pdf>

- [12] FERWERDA, James A. *Elements of Early Vision for Computer Graphics* [online]. Program of Computer Graphics, Cornell University : , 2001. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=946628&userType=inst>>.
- [13] GRAY, H.: *Anatomy of the Human Body: The Tunics of the Eye* [online]. 20th edition. Philadelphia: Lea & Febiger, 1918 [cit. 2011-04-15]. X. The Organs of the Senses and the Common Integument, 1396 s. Dostupné z WWW: <<http://www.bartleby.com/107/225.html#i882>>. ISBN 1-58734-102-6.
- [14] HABEL, J. *Zrak a vidění (1. část) . Světlo* [online]. 2008, 5, Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37974>.
- [15] HABEL, J., et al. *Světelná technika a osvětlování*. Praha : FCC Public, 1995. 437 s. ISBN 80-90-1985-0-3.
- [16] HABEL, J.; ŽÁK, P., *Význam mezopického vidění pro praxi. Světlo* [online]. 2007, 6, [cit. 2010-10-28]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36187>.
- [17] HUTCHISON, Jim. *Jim on light* [online]. 2009-09-25 [cit. 2011-03-21]. The Kruithof Curve – Color Temperature VS Illuminance . Dostupné z WWW: <<http://www.jimonlight.com/2009/09/25/the-kruithof-curve-color-temperature-vs-illuminance/>>.
- [18] Hvezdarna [online]. [cit. 2011-02-03]. *Navod na pouziti vesmiru*. Dostupné z WWW: <<http://navod.hvezdarna.cz/navod/oko.htm>>.
- [19] HyperPhysics [online]. [cit. 2010-11-02]. *Rods and Cones*. Dostupné z WWW: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/rodcone.html#c3b>>.
- [20] JOSEFOWICZ, Jack; HA, Debbie. *Vision and exterior lighting: Shining some light on scotopic and photopic lumens in roadway conditions*, 2008. 10 s.
- [21] KALITOVÁ , Jana; ŠPAČKOVÁ , Kateřina. *Anatomie a fyziologie oka II*. [online]. Dostupné z WWW: <www.ocniklinikaol.cz/prednasky/anat2.ppt>.
- [22] KALITOVÁ , Jana; ŠPAČKOVÁ , Kateřina. *Anatomie a fyziologie oka III*. [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.ocniklinikaol.cz/prednasky/anat3.ppt>>.
- [23] LED Light of the Future. Lichtwissen. 60 s.
- [24] Lighting Engineering 2002. Valladolid: Indalux Iluminacion Tecnica, 2002. 274 s.

- [25] Lighting research Center [online]. [cit. 2011-03-15]. Color Rendering Index, CRI. Dostupné z WWW: <<http://www.lrc.rpi.edu/education/learning/terminology/cri.asp>>.
- [26] NARISADA; SCHREUDER et al. Light Pollution Handbook. The Netherlands : Springer, 2004. 943 s. ISBN 978-1-4020-2665-2.
- [27] Nichia [online]. [cit. 2010-12-02]. Light Emitting Diode(LED) . Dostupné z WWW: <<http://www.nichia.co.jp/en/product/led.html>>.
- [28] Okas [online]. Příloha generelu veřejného osvětlení statutárního města Ostravy. Dostupné z WWW: <http://www.okas.cz/userfiles/dokumenty/priloha_7.PDF>.
- [29] Performance based model for mesopic photometry [online]. Lightinglab, 2005. Dostupné z WWW: <http://www.lightinglab.fi/CIETC1-58/files/MOVE_Report.pdf>.
- [30] Philips veřejné osvětlení : bílé světlo. In NAPLNĚNÍ DATOVÉHO PASPORTU - VO V OSTRAVĚ. Ostrava : VŠB-TUO, 30 s.
- [31] Sasha. Allykat design [online]. 2010-04-14. Taking awesome photos: Part 1-White balance. Dostupné z WWW: <<http://www.allykatdesign.com/2010/05/14/taking-awesome-photos-part-1-white-balance/>>.
- [32] Science Photo Library [online]. [200-] [cit. 2011-04-15]. Retina, SEM. Dostupné z WWW: <http://www.sciencephoto.com/images/download_lo_res.html?id=804240184>.
- [33] SCHUBERT, E. F.: Light-emitting diodes. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 432 s. Dostupný z WWW: <http://books.google.com/books?id=0H4bWIpaXb0C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. ISBN 0-521-86538-8.
- [34] SOKANSKÝ, K., et al. ÚSPORY ENERGIE V OSVĚTLOVÁNÍ PŘI HODNOCENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI BUDOV. Ostrava : VŠB-TUO, 2009. 88 s.
- [35] Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan. USA : U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011. 131 s. Dostupné z WWW: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2011_web.pdf>.
- [36] ŠPAČKOVÁ , Kateřina; KALITOVÁ , Jana. Anatomie a fyziologie oka I. 22 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ocniklinikaol.cz/prednasky/anat1.ppt>>.
- [37] Tedmontgomery [online]. Anatomy, Physiology & Pathology of the Human Eye. Dostupné z WWW: <http://www.tedmontgomery.com/the_eye/index.html>.

- [38] Telescope-optics [online]. [cit. 2011-01-16]. Eye spectral and intensity response, contrast sensitivity . Dostupné z WWW: <http://www.telescope-optics.net/eye_spectral_response.htm>.
- [39] Lumens and Mesopic Vision [online]. 2000 [cit. 2011-04-15]. OSRAM SYLVANIA. Dostupné z WWW: <<http://assets.sylvania.com/assets/documents/faq0016-0297.b45fd535-a55f-4676-b045-0ae709197d11.pdf>>.
- [40] VLKOVÁ, Eva; PITROVÁ, Šárka; VLK, František. Lexikon očního lékařství. 1.vydání. Brno : Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2008, s. 57
- [41] Wikipedia [online]. [cit. 2010-12-02]. Sun. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>>.
- [42] Wikipedia [online]. 2010-07-14 [cit. 2010-02-13]. Snellenova tabule. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Snellenova_tabule>.
- [43] Wikipedia [online]. 2011-02-17 [cit. 2010-03-04]. Rod cell. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Rod_cell>.
- [44] Wikipedia [online]. Sclera. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Sclera?oldid=383788837>>.
- [45] Wikipedie [online]. 2010-03-25 [cit. 2010-12-12]. Rez lid rohovkou.gif. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Rez_lid_rohovkou.gif>.
- [46] Wikipedie [online]. 2010-11-1 [cit. 2010-12-02]. Arc lamp. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Arc_lamp>.
- [47] Wikipedie [online]. 2010-11-30 [cit. 2010-12-02]. Gaslighting. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Gaslighting>>.
- [48] Wikipedie [online]. 2005. PlanckianLocus. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:PlanckianLocus.png>>
- [49] Wikipedie [online]. 2011-01-05 [cit. 2011-02-23]. Troland. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Troland>>.
- [50] Wikipedie [online]. 2011-03-07 [cit. 2010-11-10]. *Vitreous humour*. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Vitreous_humour>.
- [51] WILLIAMS, Bill. Mts [online]. 1999 [cit. 2010-12-02]. *A History of Light and Lighting*. Dostupné z WWW: <<http://www.mts.net/~william5/history/hol.htm>>.

- [52] ZHELUDEV, NIKOLAY. The life and times of the LED — a 100-year history. In The life and times of the LED — a 100-year history [online]. *Optoelectronics Research Centre, University of Southampton*, [cit. 2010-12-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.nanophotonics.org.uk/niz/publications/zheludev-2007-ltl.pdf>>.
- [53] Zpsychologie.uni-heidelberg [online]. *Das visuelle system*. Dostupné z WWW: <http://www.psychologie.uni-heidelberg.de/ae/allg/lehre/wct/w/w3_visuelles_system/w320_aufbau.htm>.
- [54] HLAVÁČ, V. *Felk.cvut.cz* [online]. [cit.]. Human Eye Physiology. Dostupné z WWW: <<http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresEn/15ImageAnalysis/61HumanEyePhysiology.ppt>>.

Seznam příloh

Příloha 1.1	Poloha ulice Blahoslavova
Příloha 2.1	Tabulka stanovení tříd osvětleností
Příloha 2.2	Modelová situace B1 – Doporučený rozsah tříd osvětlení
Příloha 2.3	Modelová situace E1 – Doporučený rozsah tříd osvětlení
Příloha 3.1	Jasová mapa s vyznačenou oblastí měření – osvětleno zdrojem LED
Příloha 3.2	Jasová mapa s vyznačenou oblastí měření – osvětleno zdrojem HPS
Příloha 4.1	Spektrální charakteristika zdroje HPS v ulici Blahoslavova (kolorovaně) a spektrální změna odraženého světla (šedou barvou)
Příloha 4.2	Odražený spektrální průběh vysokotlaké sodíkové výbojky od vozovky v ulici Blahoslavova a křivky spektrálních citlivostí zraku
Příloha 4.3	Spektrální charakteristika zdroje LED svítidla Stela Long (kolorovaně) a spektrální změna odraženého světla (šedou barvou)
Příloha 4.4	Odražený spektrální průběh zdroje LED svítidla Stela Long od vozovky v ulici Blahoslavova a křivky spektrálních citlivostí zraku
Příloha 5.1	Specifikace měřicích přístrojů
Příloha 6.1	Návrhový program Lighting Reality – vozovka + východní chodník
Příloha 6.2	Návrhový program Lighting Reality – vozovka + západní chodník
Příloha 7.1	Vizualizace I. světelné scény na ulici Blahoslavova po doporučené úpravě
Příloha 7.2	Vizualizace II. světelné scény na ulici Blahoslavova po doporučené úpravě
Příloha 8.1	Návrhový projekt v programu DIALux – Obsah
Příloha 8.2	Návrhový projekt v programu DIALux – Plánovací údaje
Příloha 8.3	Návrhový projekt v programu DIALux – Kusovník svítidel
Příloha 8.4	Návrhový projekt v programu DIALux – Silnice 1/Světelně technické výsledky
Příloha 8.5	Návrhový projekt v programu DIALux – Silnice 1/Světelně technické výsledky
Příloha 8.6	Návrhový projekt v programu DIALux – Silnice 1/Ztvárnění 3D
Příloha 8.7	Návrhový projekt v programu DIALux – Silnice 1/Vyhodnocovací pole
Příloha 8.8	Návrhový projekt v programu DIALux – Chodník – východ / tabulka výsledků
Příloha 8.9	Návrhový projekt v programu DIALux – Chodník – západ / tabulka výsledků

